



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JERE GRÖNMAN

ULTRAÄÄNIMITTAUSJÄRJESTELMÄN TOTEUTUS

Diplomityö

Tarkastajat: professori Tarmo Lipping ja

lehtori Juha Vihervaara

Tarkastajat ja aihe hyväksytty

7. joulukuuta 2016

TIIVISTELMÄ

JERE GRÖNMAN: Ultraäänimittausjärjestelmän toteutus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 52 sivua, 1 liitesivu

Maaliskuu 2017

Tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tietoverkkojen hallinta ja tietoturva

Tarkastajat: professori Tarmo Lipping ja lehtori Juha Vihervaara

Avainsanat: ultraääni, HC-SR04-ultraäänianturi, mittausjärjestelmä, Arduino Uno, Raspberry Pi 3

Tässä diplomityössä toteutettiin ultraäänimittausjärjestelmän prototyyppi. Sen tarkoituksena oli tehostaa jätehuoltoyrityksen säiliöiden etävalvontaa. Tutkimuskysymyksenä oli, kuinka luotettavia mittaustuloksia järjestelmä tuottaa.

Tutkimus koostuu teoriaosuudesta, jossa käsitellään äänen ominaisuuksia, ultraäänen muodostamista, sen käyttöä etäisyysmittauksissa ja siihen liittyviä rajoituksia. Teoriaosuuteen kuuluu myös aiempi tutkimus, joka sisältää kolme tieteellistä artikkelia samasta aihepiiristä. Käytännön osuudessa esitetään ultraäänimittausjärjestelmän kokoonpano sekä mittaustulokset.

Ultraäänimittausjärjestelmä koottiin edullisista komponenteista kuten Arduino Uno -mikrokontrollerista, Raspberry Pi 3 -tietokoneesta, HC-SR04-ultraäänianturista ja Boschin BME280-anturiyksiköstä. Järjestelmään kuuluu myös Huawei E5377 langaton 3G/4G-modeemi, johon Raspberry Pi 3 -tietokone on langattomassa WLAN-yhteydessä ja 3G/4G-modeemi välittää mittaustulokset pilvipalveluun. Järjestelmässä hyödynnettiin avoimen lähdekoodin ratkaisuja.

Mitattavat etäisyydet vaihtelivat 18,0 - 3791,0 mm välillä. Mittaustulosten systemaattisten virheiden keskiarvo on -2,0 mm ja satunnaisten virheiden keskiarvo on $\pm 0,9$ mm. Suurin systemaattinen virhe on -8,3 mm 1089,0 mm etäisyydellä. Welchin t-testin perusteella ultraäänianturin valmistajan antama tarkkuus 3,0 mm toteutuu parhaiten riskitasolla 0,05 75,0 % tapauksista mitatuista etäisyyksistä. Jos halutaan, että mittausrvirhe mahtuisi riskitasolla 0,05 sallitun toleranssin sisälle kaikilla mittausetäisyyksillä, toleranssia olisi kasvatettava 9,0 millimetriin. Kun otetaan huomioon tämän tutkimuksen alkuperäinen tavoite, voidaan todeta mittausjärjestelmän tuottavan riittävän tarkkoja tuloksia.

ABSTRACT

JERE GRÖNMAN: Implementation of an Ultrasound Measurement System

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 52 pages, 1 Appendix page

March 2017

Master's Degree Programme in Information Technology

Major: Network Management and Information Security

Examiners: Professor Tarmo Lipping and Lecturer Juha Vihervaara

Keywords: ultrasound, HC-SR04 ultrasound sensor, measurement system, Arduino Uno, Raspberry Pi 3

In this thesis, a prototype of an ultrasound measurement system was implemented. Its purpose was to make the surveillance process of tanks of a waste management company more effective. The research question was that how reliable measurement results the system produces.

The research consists of the theoretical part, in which properties of sound, the generation of ultrasound, its use in distance measurements and restrictions related to it are dealt with. In addition, the theoretical part includes the literature review of that consists of three scientific journal articles considering the same subject. In the practical part the configuration of the ultrasound measurement system is introduced and the measurement results are presented.

The ultrasound measurement system was assembled of low-cost components such as an Arduino Uno microcontroller, a Raspberry Pi 3 computer, an HC-SR04 ultrasound sensor and a Bosch BME280 sensor unit. The system also includes a Huawei E5377 3G/4G portable wireless router, to which the Raspberry Pi 3 is connected via WLAN. All the measurement results are sent to the cloud service. Open-source applications were utilized in the system.

The measured distances varied between 18,0 - 3791,0 mm. The average systematic error of the results is -2,0 mm and the average of random error is $\pm 0,9$ mm. The largest systematic error is -8,3 mm at the distance of 1089,0 mm. According to the Welch's t-test the accuracy given by the manufacturer 3,0 mm is best realized at the risk level 0,05 where the probability is 75,0 %. The probability of 100,0 % is achieved when the measurement error is 9,0 mm. Considering the original goal of this research it can be said that the accuracy of the results produced by the system is adequate.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö sai alkunsa keväällä 2016 ajatuksesta kehittää ultraäänimittausjärjestelmä jätehuoltoyritykselle. Kirjallista työtä tehtiin kuusi kuukautta Tampereen teknillisen yliopiston Porin yksikön tiloissa. Työn tekeminen sujui suunnitellusti, ja apua oli saatavissa, kun sitä tarvitsin.

Haluan kiittää Juri Hermoa, Jani Viljasta, professori Pekka Loulaa, yliopistonlehtori Jari Turusta, lehtori Juha Vihervaaraa, professori Tarmo Lippingiä ja muita tukena olleita.

Porissa, 6.2.2017

Jere Grönman

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | TEORIAA ULTRAÄÄNESTÄ..... | 3 |
| 2.1 | Ääniaallon eteneminen..... | 3 |
| 2.2 | Ultraäänen muodostaminen ja rajoitukset..... | 5 |
| 2.3 | Ultraäänen käyttö etäisyysmittauksissa | 9 |
| 3 | AIEMPI TUTKIMUS..... | 11 |
| 3.1 | SMS-välitteisen vedenpinnan mittausjärjestelmän suunnittelu ja toteutus..... | 11 |
| 3.2 | Ultraäänimittaus HC-SR04-anturilla | 13 |
| 3.3 | Nesteenpinnan tason ultraäänimittauslaite..... | 15 |
| 4 | MITTAUSJÄRJESTELMÄ | 17 |
| 4.1 | Määrittely | 17 |
| 4.2 | Suunnittelu | 18 |
| 4.3 | Toteutus..... | 32 |
| 5 | TULOSTEN ANALYSOINTI | 35 |
| 5.1 | Mittausepävarmuus | 35 |
| 5.2 | Studentin t-testi | 39 |
| 5.3 | Saadut tulokset | 40 |
| 6 | YHTEENVETO | 45 |
| | LÄHTEET | 48 |

Liite A: Mittaustulosten tunnusluvut sekä systemaattiset ja satunnaiset virheet

KUVALUETTELO

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| Kuva 1. | <i>Poikittais- ja pitkittäisaaltojen liike. (Premed HQ 2016).....</i> | 4 |
| Kuva 2. | <i>Muuttimen vaikutus aallon muotoon. (Cartz 1995).....</i> | 5 |
| Kuva 3. | <i>Anturin toiminta-alue. (Rockwell Automation 2016).....</i> | 6 |
| Kuva 4. | <i>Tyypillinen keilakuvio. (Airmar 2016).....</i> | 7 |
| Kuva 5. | <i>Ongelmallisia mittaushkohteita. (Arcbotics 2016).....</i> | 8 |
| Kuva 6. | <i>Ultraäänianturin toimintaperiaate. (Wiora 2005).....</i> | 9 |
| Kuva 7. | <i>Järjestelmän komponentit. (Saraswati et al. 2012)</i> | 12 |
| Kuva 8. | <i>Mittausjärjestelmän kokoonpano. (Nakatani et al. 2014)</i> | 14 |
| Kuva 9. | <i>Mittausjärjestelmän toimintaprosessi.....</i> | 18 |
| Kuva 10. | <i>Sijoittelukaavio suunnitellusta järjestelmästä.</i> | 19 |
| Kuva 11. | <i>Raspberry Pi 3:n komponentit.</i> | 20 |
| Kuva 12. | <i>Arduino Unon komponentit.....</i> | 24 |
| Kuva 13. | <i>Esimerkki sketsistä Arduino IDE -kehitysympäristössä.</i> | 26 |
| Kuva 14. | <i>Arduino Uno on kytketty LED-valo ja 220 ohmin vastus.</i> | 27 |
| Kuva 15. | <i>HC-SR04-ultraäänianturi.</i> | 27 |
| Kuva 16. | <i>Signaalin kulku. (Marlin P. Jones & Assoc. Inc. 2016).....</i> | 28 |
| Kuva 17. | <i>BME280-anturiyksikkö kiinnitettynä piirilevyyn.</i> | 29 |
| Kuva 18. | <i>Huawei E5377. (Huawei 2016)</i> | 30 |
| Kuva 19. | <i>Järjestelmän kytkennät ja yhteydet.</i> | 33 |
| Kuva 20. | <i>Normaalijakauma. (FAO 2017).....</i> | 36 |
| Kuva 21. | <i>Mittausvirheet näytteistä 1 - 10.</i> | 41 |
| Kuva 22. | <i>Mittausvirheet näytteistä 11 - 48.</i> | 41 |
| Kuva 23. | <i>Mittauskerrat, joissa systemaattinen virhe on suurin.</i> | 42 |
| Kuva 24. | <i>Mittauskerrat, joissa systemaattinen virhe on pienin.</i> | 43 |

1 JOHDANTO

Tämä tutkimus sai alkunsa jätehuoltoyrityksen tarpeesta saada tietoa säiliöiden täyttöasteesta. Tähän asti henkilökunta on käynyt paikan päällä tarkastamassa säiliöiden tilannetta, mikä aiheuttaa mahdollisesti turhia käyntejä. Paikkojen välillä on matkaa reilu 100 kilometriä. Tätä prosessia halutaan kehittää siten, että säiliöiden pinnantasoa voidaan seurata paikasta riippumatta pilvipalvelun kautta.

Säiliöt sijaitsevat tilassa, jossa lämpötila- ja kosteusolosuhteet pysyvät suhteellisen vakaina. Eri mittausten menetelmiä kartoitettaessa havaittiin ultraäänitekniikan soveltuvan pinnantason mittaamiseen paremmin kuin esimerkiksi laser- tai infrapunatekniikat. Ultraäänien käyttö todettiin käytännöllisemmäksi, koska se ei vaadi kosketusta tai vastakappaletta kohteen pintaan.

Diplomityön tutkimuskysymyksenä on, miten edullisilla komponenteilla toteutetaan luotettava ultraäänimittausjärjestelmä ja kuinka tarkkoja tuloksia se tuottaa. Tutkimuksen rajoituksina on, että etäisyyden mittaaminen suoritetaan sisätiloissa, väliaineena on ilma, maksimimittausetäisyys on 4 metriä, käytetään yhtä ultraäänianturia (HC-SR04) eikä mitauksessa mennä aineen sisälle. Tutkimuksessa ei oteta kantaa pilvipalvelun käyttöliittymään, ultraäänianturin signaalien aikasarja-analyysiin, mittausjärjestelmän kotelointiin eikä sen asentamiseen käyttökohteessa.

Tutkimuksen tavoitteena on luoda luotettava ultraäänimittausjärjestelmän prototyyppi, joka perustuu avoimeen lähdekoodiin ja edullisiin komponentteihin. Prototyypin odotetaan kykenevän mittaamaan tietyn virhemarginaalin sisällä. Prototyypin luonnissa hyödynnetään pääosin avoimen lähdekoodin yhteisön tuottamia ratkaisuja sekä alan kirjallisuutta. Suomen avoimien tietojärjestelmien keskus (COSS ry) määrittelee, että ”avoimen lähdekoodin ohjelmistojen kehitysmallissa sekä ideat että toteutukset ovat kaikkien nähtävissä ja hyödynnettävissä. Kehitystä ei hallinnoi vain yksi yritys vaan mukana on maailmanlaajuinen yhteisö, joka koostuu sekä yksityishenkilöistä että yrityksistä. Kaikki voivat osallistua kehitystyöhön ja ohjelmistovirheet on mahdollista löytää ja korjata nopeasti.” (COSS 2016)

Tämä tutkimus on luonteeltaan kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusta. Asioita kuvataan numeeristen suureiden avulla ja tuloksia voidaan havainnollistaa taulukoin tai kuvaajin. Tiedonkeruumenetelmänä käytetään kokeellista tutkimusta, joka tässä tapauksessa perustuu mittaustuloksiin. Kokeellisessa tutkimuksessa testataan tietyn olettamuksen paikkansapitävyys erityisessä koetilanteessa. Oletamus on, että ultraäänimittausjärjestelmä antaa oikeita tuloksia. Nämä tulokset muodostavat koeryhmän, jota verrataan vertailuryhmään, joka koostuu mittanauhalla toteutetuista mittaustuloksista. (Heikkilä 1998)

Tutkimusprosessin käynnistää tutkimusongelman määrittäminen ja samasta aiheesta aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin, niissä esitettyihin tutkimustuloksiin ja olemassa olevaan teorian tietoon perehtyminen. (Heikkilä 1998)

Tähän tutkimukseen liittyvää teorian tietoa käsitellään luvussa 2, jossa esitetään äänen ja erityisesti ultraäänien ominaisuuksia. Näitä ovat äänen eteneminen, ultraäänien muodostaminen, sen käyttö etäisyysmittauksissa ja siihen liittyvät rajoitukset. Aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia esitellään luvussa 3. Se sisältää katsauksen kolmesta tieteellisestä artikkelista, jotka perustuvat tutkimuksiin, joissa on käytetty vastaavanlaisia välineitä ja menetelmiä kuin tässä tutkimuksessa. Sopivien artikkelien, joissa on konkreettisia mittaustuloksia, oli hankala löytää. Luvut 4 ja 5 sisältävät tutkimuksen käytännön osuuden, joka koostuu ultraäänimittausjärjestelmän määrittelystä, suunnittelusta ja toteutuksesta sekä mittaustulosten analysoinnista. Luvussa 4 esitellään järjestelmän toiminta, komponentit ja niiden ominaisuudet sekä niiden väliset kytkennät. Luvussa 5 analysoidaan järjestelmän tuottamia mittaustuloksia ja verrataan niitä aikaisempiin tutkimustuloksiin.

Tutkimuksessa on hyödynnetty avoimen lähdekoodin ohjelmia kuten Fritzing-suunnitteluohjelmaa prototyypin luonnissa, draw.io-selainohjelmistoa kaavioiden teossa ja Arduino IDE -kehitysympäristöä ohjelmakoodin tuottamisessa. Mittaustulosten analysoinnissa on käytetty suljettuja ohjelmistoja kuten MathWorks MATLAB R2016b -laskentaohjelmaa ja Microsoft Excel 2016-tilukkolaskentaohjelmaa.

2 TEORIAA ULTRAÄÄNESTÄ

Lepakot ovat tunnettuja kyvystään suunnistaa ultraäänen avulla. Luonnossa ultraääntä käytetään suunnistamiseen, mutta myös kommunikaatioon. Molemmissa tapauksissa eläimen pitää ottaa huomioon samoja ongelmia kuin ultraäänitekniikan avulla tehtävissä mittauksissa. Näitä ovat äänen vaimentuminen, leviäminen ja häiriintyminen. Ultraäänen etuna on sen kyky toimia visuaalisesti haasteellisissa ja taustameluisissa paikoissa.

2.1 Ääniaallon eteneminen

Ultraääni on mekaanista aaltoliikettä kuten muutkin äänet. Ultraääniaallot ovat ääntä, jonka taajuus on ihmiskorvan kuuloalueen yläpuolella. Yleinen esimerkki aaltoliikkeestä on, kun veteen pudotetaan kivi. Vedenpinta häiriintyy ja aallot kulkevat poispäin häiriintyneestä kohdasta. Häiriö välittyy partikkelilta partikkelille, joten aalto etenee. Tämän jälkeen partikkeli palaa tasapainotilaansa. Kuitenkaan partikkelit eivät liiku, vaan energia välittyy eteenpäin. Jotta energian eteneminen partikkeleiden välillä tapahtuu, tarvitaan väliainetta. Aallonpituus voidaan määritellä kahden aaltoliikkeen samassa vaiheessa olevan pisteen välillä. Aallonpituus voidaan laskea kaavalla

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

jossa λ on aallonpituus, c on aallon etenemisnopeus ja f on taajuus. (Mansfield & O'Sullivan 2011) Aallonpituus on olennainen osa ultraäänitunnistusta ja arviointia. Ultraäänitunnistuksessa kohteen koon tulee olla vähintään puolet aallonpituudesta käyttötaajuusalueella. Jos tunnistettavan kohteen kriittinen koko tiedetään, taajuusalueen valinta on helpompaa. (Ihara 2008)

Ääniaallon voimakkuus määritellään kaavalla

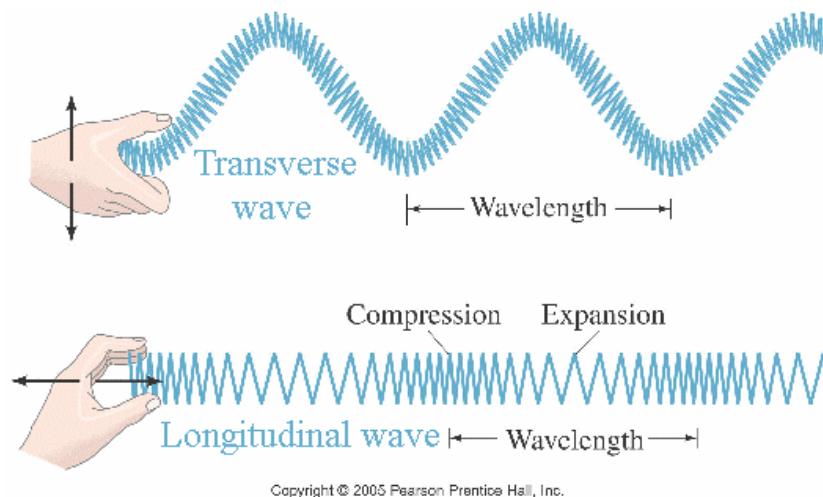
$$I = \frac{P}{A}, \quad (2)$$

jossa I on äänenvoimakkuus, P on teho ja A on pinta-ala. SI-järjestelmässä voimakkuuden yksikkö on W/m^2 . Äänenvoimakkuutta ilmaistaan kuitenkin yleensä desibeleinä (dB), koska desibeliasteikon muodostamiseen käytettävä kymmenkantainen logaritmi tuottaa ymmärrettävämpiä lukuarvoja. Esimerkiksi ihmiskorvan kuulokynnys on $10^{-12} W/m^2$, joka sopimuksen mukaan vastaa desibeliasteikon referenssitasoa 0 dB . Suihkukoneen aiheuttama melu on noin 140 dB eli $10^2 W/m^2$, joka on vahingollista ihmiskuulolle. Yksikkömuunnos tapahtuu kaavalla

$$\beta(dB) = 10 \log_{10} \frac{(I)}{(I_0)}, \quad (3)$$

jossa β on äänenvoimakkuus desibeleinä, I on mitattu äänenvoimakkuus W/m^2 ja I_0 on ihmisen kuulokynnystä vastaava äänenvoimakkuus $10^{-12} W/m^2$. (Openstax 2013; Williams 2012)

Aallot voivat olla pitkittäisiä (engl. longitudinal) tai poikittaisia (engl. transverse). Pitkittäisaalto liikkuu rinnakkaisesti häiriön suuntaan. Häiriö värähtelee puristaen partikkeleita kokoon suuntaan, johon aalto liikkuu aiheuttaen tiivistymis- (engl. compression) ja laajenemiskohtia (engl. expansion). Poikittäisaallossa värähtely tapahtuu kohtisuorasti aallon etenemissuuntaan nähden. Poikittäisaalto ei etene nesteessä eikä kaasussa. Sillä ei ole tiivistymis- ja laajenemiskohtia. Sen nopeus on noin puolet pitkittäisaallon nopeudesta samassa väliaineessa. Kuvassa 1 esitetään poikittais- ja pitkittäisaaltojen liike.



Kuva 1. Poikittais- ja pitkittäisaaltojen liike. (Premed HQ 2016)

Äänennopeuteen vaikuttaa myös väliaineen tiheys. Tässä tapauksessa väliaine on ilma, jossa ääni kulkee. Nopeus, jolla ääni etenee kaasussa, on vakio niin kauan kuin kaasussa ei tapahdu muutoksia. Äänennopeus voidaan laskea kaavalla

$$c = \sqrt{\gamma RT}, \quad (4)$$

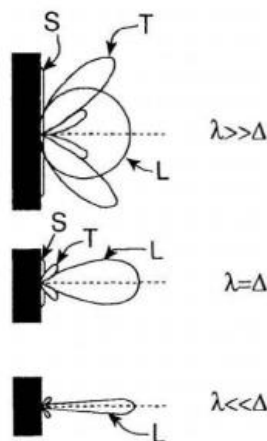
jossa c on äänennopeus, γ on adiabaattinen vakio (ilman tapauksessa 1,402), R on kaasuvakio (ilman tapauksessa 286,90) ja T on lämpötila. (Milligan et al. 2013)

2.2 Ultraäänen muodostaminen ja rajoitukset

Ultraääntä muodostetaan antureilla, joita kutsutaan muuttimiksi (engl. transducer). Ne muuttavat sähköenergian mekaaniseksi energiaksi, joka ilmenee ultraäänen värähtelynä. Ultraääniaaltojen muodostamiseen on muutamia eri tapoja: pietsosähkö (engl. piezoelectric), sähköstriktio (engl. electricstriction), magnetostriktio (engl. magnetostriction), elektromagneettinen akustinen muutin (engl. electromagnetic acoustic transducer) ja laser (engl. light amplification by stimulated emission of radiation). (Cheeke & David 2002)

Yleisin tapa muodostaa ja havaita ultraääniaaltoja on hyödyntää jonkin kiteisen materiaalin kuten kvartsin pietsosähköistä ilmiötä. Kvartsin lisäksi kiteen materiaalina voivat olla esimerkiksi bariumtitanaatti (BaTiO_3), lyijymetaniobaatti (PbNb_2O_3) ja lyijysirkonititanaatti (PZT). Pietsosähköinen ilmiö on vastavuoroinen, koska se aiheuttaa mekaanista painetta pietsosähköiseen materiaaliin syötettäessä sähköjännitettä sen läpi. Toisaalta se tuottaa sähköjännitettä, kun mekaanista painetta aiheutetaan materiaaliin. Paine aiheuttaa häiriötä pietsosähköisen kiteen pinnan lähellä oleviin molekyyliin, mikä käynnistää ultraääniaallon. Tämä prosessi voi toimia todella korkeilla taajuuksilla mahdollistaen ultraäänen muodostumisen. (Cheeke & David 2002; Ihara 2008)

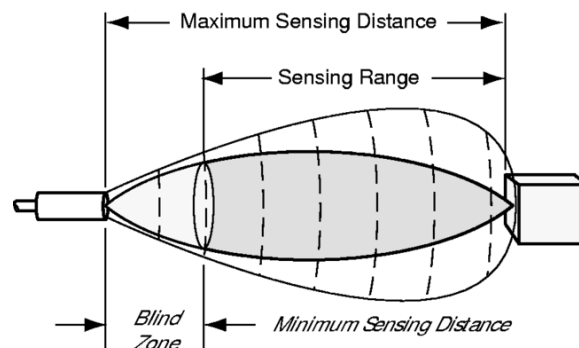
Aallolla on eri taajuuksia, jotka voidaan suoristaa ja tasoittaa. Aallon muoto riippuu aallonpituudesta ja muuttimen halkaisijasta. Kun aallonpituus on huomattavasti suurempi kuin muuttimen halkaisija, hajonta kasvaa. Aallonpituuden ollessa pienempi kuin muuttimen halkaisija hajonta on vähäistä. Kuvassa 2 esitetään kolme eri tilannetta, joissa aallonpituus on joko pienempi, yhtä suuri tai suurempi kuin muuttimen halkaisija. L kuvaa pitkittäistä, T poikittaista ja S pinta-aaltoa. (Cartz 1995)



Kuva 2. Muuttimen vaikutus aallon muotoon. (Cartz 1995)

Ääniaalto jakautuu kahteen eri alueeseen: lähi- (engl. near field) ja kaukokenttään (engl. far field). Jako on suoritettu, koska aallon voimakkuus ei ole tasainen. Voimakkuuden heilahtelun lisäksi aallon alussa on niin sanottu kuollut alue (engl. blind tai dead zone). Kuolleen alueen pituus riippuu aaltojen kestosta. Kun muutin lähettää aaltoja, se ei voi vastaanottaa kaikua ennen kuin lähetetty aalto on hävinnyt. Siksi muuttimen kiteen vaimennusominaisuus on tärkeää, jotta kide ei resonoi liian pitkään pidentäen kuollutta aluetta. (Cartz 1995)

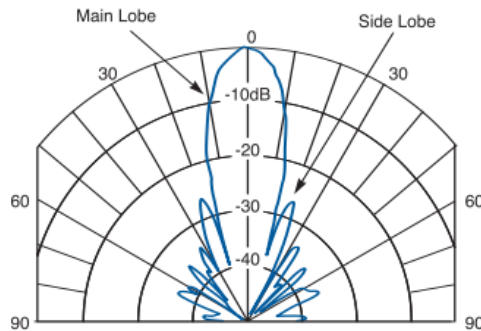
Ultraäänianturin toimintaan liittyviä avainkohtia ovat myös anturin toiminta-alue (engl. sensing range), mittauskulma (engl. beam angle), kaiun varmuus (engl. echo confidence) ja vaimennus (engl. attenuation). Maksimitoimintaetäisyys (engl. maximum sensing distance) kertoo suurimman mitattavan etäisyyden. Siihen vaikuttavat anturin malli, ympäristöolosuhteet, elektroniikan suunnittelu ja signaalinkäsittely. Matalataajuuksisten antureiden maksimitoiminta-alue ulottuu pidemmälle kuin korkeataajuuksisten, koska ne kärsivät vähemmän ympäristöolosuhteista. Korkeataajuuksisia antureita käytetään tarkempiin mittauksiin, joissa on lyhyempi kantama ja parempi erottelukyky. Anturilla on myös minimimittausetäisyys (engl. minimum sensing distance), esimerkiksi 2 senttimetriä, jota lähempänä olevia kohteita ei havaita. Tämä johtuu siitä, että kaikkien anturin lähettämien aaltojen pitää olla perillä ennen kuin voidaan vastaanottaa kaikua kohteelta. Kuvassa 3 esitetään anturin toiminta-aluetta. (Massa 1999; Milligan 2006)



Kuva 3. Anturin toiminta-alue. (Rockwell Automation 2016)

Mittauskulma määrittää mittausalueen leveyssuunnassa. Koska ultraäänianturin lähettämä ääniaalto on kartiomainen, vain sen sisällä olevat kohteet havaitaan. Paras tulos saadaan, kun kohde on suorassa linjassa anturin kanssa. Pääkeilan (engl. main lobe) pituus määrittää maksimimittausetäisyyden. Sen koko riippuu anturille annettavan virran määrästä. Pääkeilan muodostamisesta jäljelle jäänyt virta muodostaa sivukeiloja (engl. side lobe). Ne eivät ole toivottuja, koska ne peittävät kohteen todellisen sijainnin aiheuttamalla

harhakaikuja (engl. false echo). Jokaisessa muuttimessa on sivukeiloja, mutta laadukkaassa muuttimessa niitä on pystytty vähentämään. Kuvassa 4 esitetään tyypillinen keilakuvio. (Airmar 2016; Milligan 2006)



Kuva 4. Tyypillinen keilakuvio. (Airmar 2016)

Leveä mittauskulma heikentää anturin tarkkuutta leveyssuunnassa. Sen sijaan kapea mittauskulma on tarkempi, mutta mitattaessa laajaa aluetta tarvitaan monta anturia. Leveä mittauskulma jakaa keilan laajemmalle alueelle, jolloin takaisin heijastuva kaiku on heikompi kuin kapealla mittauskulmalla. Verrattuna leveään keilaan, kapean keilan kaiun voimakkuus vaihtelee enemmän mitattaessa epätasaisia pintoja kuten aaltoilevaa nestettä. (Airmar 2016)

Kaiun varmuus tarkoittaa kuinka luotettavasti ääniaalto palaa takaisin. Kohteen pinnan geometria ja laatu vaikuttavat kaiun voimakkuuteen ja luotettavuuteen. Äänenpainetta vähentävä leviämismuunnos voidaan laskea kaavalla

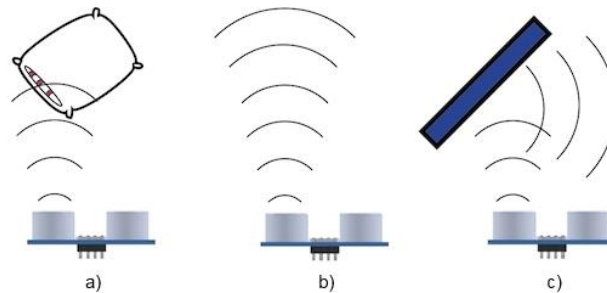
$$20 \log_{10} \frac{(R)}{(R_0)}, \quad (5)$$

jossa R on etäisyys anturilta kohteelle, R_0 on vertailuarvo etäisyydestä (esimerkiksi mitatun alueen antama mittaustulos). Samanlainen heikentyminen ilmenee kaiussa kohteelta anturille aiheuttaen kokonaisheikentymisen kaavalla

$$40 \log_{10} \frac{(R)}{(R_0)}. \quad (6)$$

Termiä maalivoimakkuus (engl. target strength) käytetään kohteen heijastuvuuden mittaamisessa, joka määritellään 10-kantaisella logaritmilla kohteelta palaavan äänen voimakkuudesta vertailuetäisyydellä sen akustisesta keskuksesta (engl. acoustic centre) jaettuna lähetetyn ääniaallon voimakkuudella. Yksinkertaisten geometrinen muotojen maalivoimakkuus voidaan teoreettisesti laskea. Maalivoimakkuus muuttuu merkittävästi,

jos kohde liikkuu tai äänen suhteellinen nopeus vaihtelee. Kuvassa 5 esitetään kolme tilannetta, joiden tapauksessa kaiku ei palaa luotettavasti takaisin: a) kaikua ei havaita, koska kangas absorboi ääniaallon, b) kaikua ei havaita, koska kohde on liian kaukana ja c) kaikua ei havaita, koska kohde on liian suuressa kulmassa ääniaaltoihin nähden. (Massa 1999)



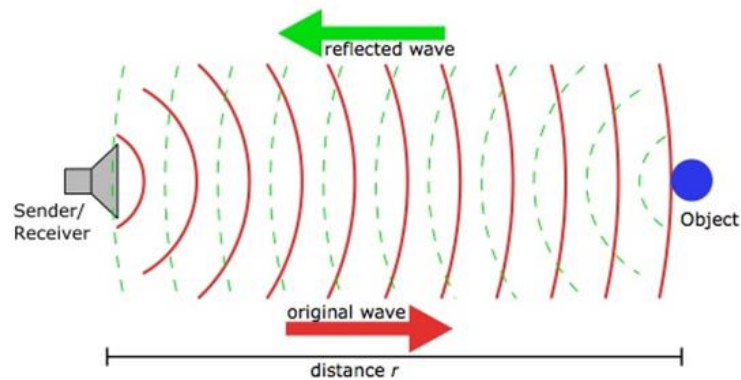
Kuva 5. Ongelmallisia mittauskohteita. (Arcbotics 2016)

Kun ultraääniaalto etenee väliaineessa, energiahäviö aiheuttaa vaimenemista. Vaimeneminen ilmenee ääniaallon voimakkuuden heikkenemisenä. Aallon voimakkuuteen ja muotoon vaikuttavia tekijöitä ovat lähetettävän aallon geometrinen muoto, energian absorboituminen ilmaan ja ympäristötekijät (pöly, kosteus). Anturin lähetettävän aallon geometrinen muoto riippuu siitä, kuinka suurelle alalle se leviää. Energian absorboitumiseen vaikuttaa neljä tekijää: taajuus, lämpötila, kosteus ja ilmanpaine. Absorboituminen lisääntyy taajuuden kasvaessa ja lämpötilan noustessa. (Álvarez Franco & Ureña Ureña 2009)

Ultraäänianturin korkea herkkyys voi joissakin tapauksissa muuttua heikkoudeksi. Esimerkiksi toiminta-alueen ohitse lentävät hyönteiset tai linnut voivat häiritä mittausta. Ultraäänianturin toimintaperiaatteesta johtuen siihen vaikuttavat ympäristötekijät kuten lämpötila, ilmanpaine, kosteus, ilmanpyörteet ja jopa kohteen pinnanmuoto. Esimerkiksi ääniaallot heijastuvat tehokkaammin sileästä pinnasta (esimerkiksi lasista) kuin epätasaisesta pinnasta. Jotkut kohteet kuten vaatteet absorboivat ultraääniaaltoja eivätkä lähetä niitä takaisin. Jotkin aineet kuten kangas, pehmeä kumi, jauho ja vaahto absorboivat ääntä, joten ne ovat huonoja mittauskohteita. (Rockwell Automation 2016)

2.3 Ultraäänen käyttö etäisyysmittauksissa

Ultraäänitunnistustekniikat ovat kehittyneet hyvälle tasolle ja niitä käytetään monilla tekniikan ja tieteen aloilla. Monet ultraäänilaitteet ja ohjelmistot ovat kaupallisia ja käytössä teollisuuden ja lääketieteen sovelluksissa. Ultraäänianturi on sähkölaite, joka muuttaa sähköenergiaa ultraääneksi. Ultraäänellä tehtävät etäisyysmittaukset perustuvat kulkuai-katekniikkaan (engl. time-of-flight). Tekniikassa on monia erilaisia menetelmiä, joista pulssikaikumenetelmä (engl. pulse-echo method) on yleisin. Ultraäänitunnistustekniikan periaate on se, että äänennopeus on suhteellisen vakio. Ultraäänipulssin käyttämä aika kulkeakseen sen lähteestä mittaushohteeseen ja siitä takaisin anturille on suoraan verrannollinen hohteeseen etäisyyteen. Kuvassa 6 esitetään ultraäänianturin toimintaperiaate. (Ihara 2008; Karlsson & Pedersen 2014; Rockwell Automation 2016)



Kuva 6. Ultraäänianturin toimintaperiaate. (Wiora 2005)

Mitattaessa etäisyyttä hohteeseen ultraäänianturilla käytetään kaavaa

$$s = \frac{ct}{2}, \quad (7)$$

jossa s on etäisyys, c on äänennopeus ja t on ajanjakso ääniaallon lähettämisestä vastaanottamiseen. Etäisyyden määrittämiseksi hohteeseen aika jaetaan kahdella, koska aallon kulku-aika koostuu lähettämisestä ja vastaanottamisesta. (Nalini et al. 2014)

Ympäristötekijöistä lämpötila on merkittävin tekijä, joka vaikuttaa äänennopeuteen ilmassa. Äänennopeus on 331,5 metriä sekunnissa, kun lämpötila on 0 °C. Vastaavasti 20 °C lämpötilassa äänennopeus on 343,4 metriä sekunnissa. Yhden celsiusasteen nousu lämpötilassa kasvattaa äänennopeutta 0,607 metriä sekunnissa. Tällöin lämpimässä ilmassa mittaustulos on pienempi kuin kylmässä ilmassa. Tämä ongelma voidaan korjata lämpötilaa kompensoivalla kaavalla

$$s = \frac{c + 0,607T \cdot t}{2}, \quad (8)$$

jossa T on ympäristön lämpötila. (Nalini et al. 2014)

Ultraääniantureita käytetään usein etäisyyksien kuten pinnantasojen mittaamiseen. Ne kykenevät tunnistamaan kohteita, jotka voivat olla kirkkaita, läpinäkymättömiä, neste-mäisiä, kiinteitä tai rakeisia (metalli, paperi, muovi, lasi ja betoni). Kohteilla täytyy olla riittävä akustinen heijastavuus. Ultraäänianturi ei ole riippuvainen kohteen pinnan väristä tai sen optisesta heijastavuudesta. Esimerkiksi läpinäkyvä lasilautanen, ruskea keraami-nen lautanen, valkoinen muovilautanen ja kiiltävä alumiinilautanen käyttäytyvät samoin. Ultraäänianturia eivät häiritse ulkoiset häihteet kuten valo, savu, värinä, infrapu-nasäteily, taustamelu eivätkä sähkömagneettiset häiriöt (Karlsson & Pedersen 2014; Rockwell Automation 2016)

Ultraäänianturit ovat sopivia mittaustyökaluja mitattaessa etäisyyksiä ilman kontaktia kohteeseen. Niiden tyypillisiä käyttökohteita ovat teollisuuden säiliöiden täyttöasteen valvonta, autojen pysäköintitutka, ilmavirtauksen nopeuden mittaaminen (akustinen anemometri), ostoskeskusten automaattiovet, kuljetusajoneuvojen lastausturvallisuus, puomiteknologia ja robotiikka (engl. robotics). Esimerkiksi valvottaessa nestesäiliöiden pinnantaso anturilta lähtevä ääniaalto osuu nesteen pintaan ja heijastuu takaisin anturille. Kun tiedetään säiliön korkeus, voidaan tästä laskea nesteen pinnan taso, koska ääniaallon kulkema aika on verrannollinen matkaan. (Kelemen et al. 2015; Seebo 2016)

3 AIEMPI TUTKIMUS

Tähän tutkimukseen etsittiin aihealueeseen liittyviä aikaisempia tutkimustuloksia pääasiassa Google Scholar (<https://scholar.google.fi>), Scienceport (<http://scienceport.tut.fi/information-technology>) ja Researchgate (<https://www.researchgate.net/>) -verkkopalveluista. Tarkoitus oli löytää sopiva ultraäänianturi, joka soveltuu käytettäväksi Arduino Uno -mikrokontrollerin ja Raspberry Pi 3 -tietokoneen kanssa, joista oli aiempaa kokemusta. Ultraäänianturiksi valittiin HC-SR04, koska siitä löytyi mainintoja useista eri lähteistä, eritoten robotiikan saralta. Tässä tutkimuksessa HC-SR04-ultraäänianturia käytetään etäisyyden mittaamiseen, kuten seuraavissa artikkeleissa on käytetty. Nämä artikkelit valittiin, koska ne sisältävät konkreettisia mittaustuloksia.

3.1 SMS-välitteisen vedenpinnan mittausjärjestelmän suunnittelu ja toteutus

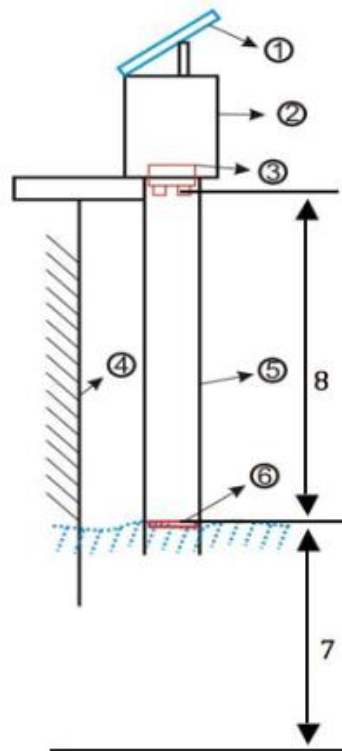
Pelita Harapanin (Indonesia) yliopiston sähkötekniikan laitoksella Saraswati et al. (2012) ovat tutkineet tulvavaroitusjärjestelmän kehittämistä ultraäänitekniikalla. He ovat kirjoittaneet aiheesta konferenssiartikkelin marraskuussa vuonna 2012. Kuantama & Saraswati (2015) ovat lisäksi kirjoittaneet aiheesta artikkelin Internetworking Indonesia Journalin numeroon seitsemän vuonna 2015. Vedenpinnan mittaus sähköisesti ei ole ollut yleistä Indonesiassa. Tutkimuksen lähtökohtana ovat ajoittaiset tulvat Jakartassa. Tulvavaroitusjärjestelmää tarvitaan ehkäisemään niiden aiheuttamia vahinkoja.

Kyseisen järjestelmän on tarkoitus antaa varoitus, kun vedenpinta nousee liian korkealle. Yhtenä tutkimuksen tavoitteena oli tutkia ultraäänianturin mittaustarkkuutta PVC-putken sisällä. Testattavia antureita oli aluksi kahta mallia: HC-SR04- ja Parallax Ping -ultraäänianturit. Testauksessa havaittiin, ettei Parallax Ping pysty suoriutumaan mittauksista sijoitettuna putken sisälle. Järjestelmä on tarkoitettu ulkokäyttöön, joten ultraäänianturin sijoitus putkeen on tarpeellista. Näin ollen käyttöön valittiin HC-SR04-ultraäänianturi, joka toimi putken sisällä. Putkeen sijoitetun ultraäänianturin mittausrvirheen suuruusluokka oli 3,7 %. Putken minimihalkaisija riippuu ultraäänianturin mittauskulmasta.

Järjestelmä koostuu PLCC AT89S51 -mikrokontrollerista, HC-SR04-ultraäänianturista SIM 300C -modeemista, neljän metrin pituisesta PVC-putkesta ja aurinkopaneelistä. Mittaustulokset käsitellään mikrokontrollerissa, jonka jälkeen lähetetään SMS-viesti, jos vedenpinta ylettyy tiettyyn korkeuteen. Tasoja on kolme: turvallinen, tulva-altis ja tulva.

Kuvassa 7 esitetään järjestelmän komponentit, jotka ovat:

1. Aurinkopaneeli
2. Mikrokontrolleri+300C-modeemi
3. HC-SR04-ultraäänianturi
4. Vesialtaan reuna
5. PVC-putki
6. Vedenpinta
7. Nollakohta
8. Anturin ja nollakohdan väli.



Kuva 7. Järjestelmän komponentit. (Saraswati et al. 2012)

Teoriassa HC-SR04-ultraäänianturin maksimimittausetäisyys on neljä metriä ja mittauskulma on 15 astetta. Kun PVC-putken pituus on neljä metriä, voidaan laskea sen säde kaavalla

$$r = \tan \alpha \cdot l, \quad (9)$$

jossa r on säteen pituus, α on kulman suuruus (puolet mittauskulmasta) ja l on putken pituus. Tutkimuksessa havaittiin kuitenkin, että putken halkaisijaksi riittää 23 senttimetriä riittävän tarkkojen mittaustulosten saavuttamiseksi. Putkeen sijoitetun ultraäänianturin

mittaustulosten ja todellisten etäisyyksien väliseksi keskimääräiseksi virheprosentiksi saatiin 3,74 %. Taulukossa 1 esitetään mittaustulokset virheprosentteineen.

Taulukko 1. Mittaustulokset virheprosentteineen. (Saraswati et al. 2012)

| Todellinen etäisyys (cm) | Anturin tulos (cm) | Virheprosentti (%) |
|--------------------------|--------------------|--------------------|
| 5 | 5 | 0 |
| 10 | 11 | -10 |
| 20 | 22 | -10 |
| 30 | 32 | -6,67 |
| 40 | 42 | -5 |
| 50 | 52 | -4 |
| 60 | 63 | -5 |
| 70 | 71 | -1,43 |
| 80 | 81 | -1,25 |
| 90 | 89 | 1,11 |
| 98 | 96 | 2,04 |
| 100 | 97 | 3 |
| 283 | 279 | 1,41 |
| 285 | 281 | 1,40 |

Tutkimuksen tuloksena havaittiin, että HC-SR04-ultraäänianturi toimii paremmin kuin Parallax Ping -ultraäänianturi, kun se on sijoitettu PVC-putkeen. Järjestelmässä käytettävän 4 metrin pituisen PVC-putken vähimmäishalkaisijaksi todettiin riittävän 23 senttimetriä. Vedenpinnan tason mittaustulosten tarkkuus 5 prosentin toleranssilla on 96,3 %. Järjestelmä on asetettu laskemaan vedenpinnan tasoa kolme kertaa ennen kuin SMS-viesti lähetetään pääkäyttäjälle. Järjestelmän todettiin toimivan luotettavasti vähillä virheillä.

3.2 Ultraäänimittaus HC-SR04-anturilla

Paraná (Brasília) teknillisen yliopiston elektroniikan laitoksella Nakatani et al. (2014) ovat julkaisseet konferenssiartikkelin aiheesta ”Ultraäänimittaus HC-SR04-anturilla” lokakuussa vuonna 2014. Tutkimuksessa käsitellään etäisyyden mittaamista ultraäänianturilla. Mittaustuloksia on verrattu ristisyöttöpöydän (engl. X-Y table) antamiin tuloksiin, jotta voidaan varmistua ultraäänimittaamisen metrologisista tunnusmerkeistä.

Ultraäänimittausjärjestelmä koostuu HC-SR04-anturista ja Arduino Uno -mikrokontrollerista. Ohjelmakoodissa Arduino Uno ohjaa HC-SR04-anturia suorittamaan mittauksia ja tulostamaan viiden sekunnin välein tulokset konsoli-ikkunaan. Tutkijat ovat käyttäneet korkeatarkkuuksista ristisyöttöpöytää tulosten vertailuun 20 mm ja 120 mm välillä. Ris-

tisyöttöpöydällä voidaan mitata etäisyyksiä tuhannesosamillimetrin tarkkuudella. Mittaukset on suoritettu konetekniikan laitoksen mittauslaboratoriossa 14.3.2014. Kuvassa 8 on kyseinen mittausjärjestelmä.



Kuva 8. Mittausjärjestelmän kokoonpano. (Nakatani et al. 2014)

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa on tehty viisi mittauskierrosta ja jokaisen mittauskierroksen aikana on mitattu kaksi kertaa. Mittaus on aloitettu 20 millimetristä, koska se on anturivalmistajan suosittelema vähimmäisetäisyys. Ristisyöttöpöytää siirrettiin 5 millimetrin välein ja jokaisen etäisyyden kohdalla suoritettiin kaksi mittausta.

Taulukossa 2 on esitetty mittaustulokset ja niitä analysoitaessa havaittiin, että systemaattisten virheiden keskiarvo oli -3,0 mm ja suurin virhe -8,9 mm mittausetäisyyden ollessa 80 mm. Satunnaiset virheet tapahtuivat keskimäärin välillä $\pm 0,64$ mm ja suurin virhe oli -9,35 mm mittausetäisyyden ollessa 80 mm. Tutkimuksen tekijöiden mielestä mittaustulosten virheet olivat liian suuria, jotta HC-SR04-anturista olisi kaupalliseen käyttöön mittauslaitteena.

Taulukko 2. Mittaustulokset 20 mm - 120 mm välillä. (Nakatani et al. 2014)

| Etäisyys | Mittaus 1 | | Mittaus 2 | | Mittaus 3 | | Mittaus 4 | | Mittaus 5 | |
|-----------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| 20 | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,1 | 22,2 | 22,2 | 22,2 | 22,2 |
| 25 | 26,4 | 26,4 | 26,6 | 26,4 | 26,4 | 25,2 | 25,9 | 25,7 | 26,7 | 26,7 |
| 30 | 31,0 | 31,0 | 31,0 | 31,0 | 31,0 | 31,0 | 30,9 | 31,0 | 31,0 | 31,0 |
| 35 | 35,9 | 35,9 | 35,7 | 35,9 | 35,9 | 35,7 | 35,9 | 35,7 | 35,9 | 35,7 |
| 40 | 39,5 | 40,3 | 40,0 | 40,9 | 41,0 | 40,0 | 40,9 | 41,0 | 40,9 | 41,0 |
| 45 | 41,6 | 40,9 | 41,6 | 41,6 | 45,5 | 44,5 | 41,6 | 45,5 | 42,2 | 45,5 |
| 50 | 46,2 | 46,0 | 46,2 | 46,0 | 46,0 | 45,2 | 45,2 | 46,0 | 45,2 | 46,2 |
| 55 | 50,9 | 49,8 | 50,9 | 50,9 | 50,9 | 49,7 | 47,2 | 51,2 | 47,2 | 47,2 |
| 60 | 54,5 | 55,5 | 55,5 | 59,5 | 56,0 | 54,5 | 56,0 | 54,8 | 55,5 | 56,0 |
| 65 | 60,5 | 59,7 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,8 |
| 70 | 65,7 | 64,8 | 69,0 | 70,0 | 70,0 | 69,1 | 70,0 | 69,0 | 69,0 | 65,3 |
| 75 | 69,5 | 70,7 | 70,5 | 69,3 | 71,2 | 70,0 | 70,0 | 71,2 | 70,0 | 70,9 |
| 80 | 71,6 | 70,7 | 71,6 | 70,5 | 71,6 | 70,5 | 70,5 | 71,6 | 70,5 | 71,6 |
| 85 | 80,0 | 78,8 | 80,3 | 79,3 | 80,3 | 79,3 | 79,3 | 80,3 | 80,3 | 79,3 |
| 90 | 85,2 | 84,0 | 84,5 | 85,7 | 84,7 | 85,7 | 85,7 | 84,5 | 85,7 | 84,5 |
| 95 | 92,9 | 93,8 | 94,5 | 93,3 | 93,3 | 94,5 | 94,5 | 93,3 | 93,3 | 94,5 |
| 100 | 94,5 | 95,3 | 94,5 | 95,3 | 95,3 | 94,7 | 95,3 | 94,5 | 95,5 | 94,5 |
| 105 | 100,2 | 99,1 | 99,0 | 100,3 | 100,3 | 99,1 | 99,0 | 100,3 | 100,2 | 99,0 |
| 110 | 103,8 | 104,8 | 105,3 | 104,5 | 105,5 | 104,5 | 105,3 | 104,1 | 104,1 | 105,3 |
| 115 | 109,0 | 107,8 | 110,5 | 109,3 | 110,3 | 109,3 | 109,3 | 110,5 | 109,8 | 109,3 |
| 120 | 117,8 | 117,9 | 118,3 | 118,3 | 118,4 | 118,3 | 115,7 | 114,8 | 114,7 | 114,8 |
| Aika | Alku | Loppu | Alku | Loppu | Alku | Loppu | Alku | Loppu | Alku | Loppu |
| | 15:15 | 16:00 | 16:15 | 16:30 | 16:35 | 16:50 | 16:55 | 17:10 | 17:10 | 17:20 |
| Lämpötila | 25°C | 25°C | 25°C | 25°C | 25°C | 25°C | 25°C | 25°C | 25°C | 25°C |

3.3 Nesteenpinnan tason ultraäänimittauslaite

Sokoton (Nigeria) osavaltion tutkijat Suleiman et al. (2015) ovat julkaisseet artikkelin aiheesta ”Nesteenpinnan tason ultraäänimittauslaite” toukokuussa vuonna 2015. Tutkimus käsittelee sulautettua mittausjärjestelmää, joka on toteutettu HC-SR04-ultraäänianturilla. Eräs sen lähtökohdista on etsiä turvallisempia mittausmenetelmiä verrattuna sähkömekaanisiin laitteisiin, joihin liittyy turvallisuusriskejä räjähdysriskissä ympäristöissä.

Ultraäänen hyötyjä ovat sen nopeus, mittauskeilan kapeus, vaarattomuus ihmisille ja laitteiston toteuttaminen on yksinkertaista. Ultraääniaallot kulkevat äänennopeudella 343 metriä sekunnissa. Tällainen nopeus ei ole liian nopea mikrokontrollerille, jotta se mittaisi tarkasti. Käytännössä ääniaalloilta kestää 20 nanosekuntia heijastua takaisin kohteelta,

joka on kolmen metrin päässä. Mittauskeilan kapeus auttaa anturia löytämään kohteet, jotka ovat suoraan linjassa anturin kanssa.

Järjestelmä koostuu ATmega328P-mikrokontrollerista, LCD-näytöstä ja HC-SR04-ultraäänianturista. Koska äänennopeus on riippuvainen lämpötilasta, järjestelmään on liitetty myös LM35-lämpötila-anturi. Sen tarkoitus on mitata ilman lämpötilaa, jotta ultraäänianturin tuottamaa mittaustulosta voidaan tarkentaa ohjelmakoodin avulla. Taulukossa 3 esitetään äänennopeus eri lämpötiloissa.

Taulukko 3. Äänennopeus eri lämpötiloissa. (Suleiman et al. 2015)

| Ilman lämpötila °C | Äänennopeus m/s |
|--------------------|-----------------|
| -10 | 325,4 |
| -5 | 328,5 |
| 0 | 331,5 |
| 5 | 334,5 |
| 10 | 337,5 |
| 15 | 340,5 |
| 20 | 343,4 |
| 25 | 346,3 |
| 30 | 349,2 |

Tutkimus suoritettiin 25 °C lämpötilassa mittaamalla kuusi kertaa laitteen ja seinän välistä etäisyyttä. Todellinen etäisyys mitattiin mittanauhalla viisi kertaa. Tämän jälkeen laskettiin tuloksista keskiarvo. Tuloksista laskettiin suhteellinen virhe, joka oli 0,9696 %. Taulukossa 4 esitetään mittausten tulokset ja virheet senttimetreinä.

Taulukko 4. Mittaustulokset ja virheet senttimetreinä. (Suleiman et al. 2015)

| Todellinen etäisyys (cm) | Anturin tulos (cm) | Virhe (cm) |
|--------------------------|--------------------|------------|
| 50 | 51 | +1 |
| 75 | 77 | +2 |
| 100 | 100 | 0 |
| 150 | 151 | +1 |
| 200 | 202 | +2 |
| 250 | 251 | +1 |

Tutkimuksen yhteenvedossa todettiin kaiken sujuneen odotusten mukaisesti. Asentaminen sujui helposti ja järjestelmää oli helppo käyttää. Lämpötilakompensaation sanotaan toimineen tyydyttävästi.

4 MITTAUSJÄRJESTELMÄ

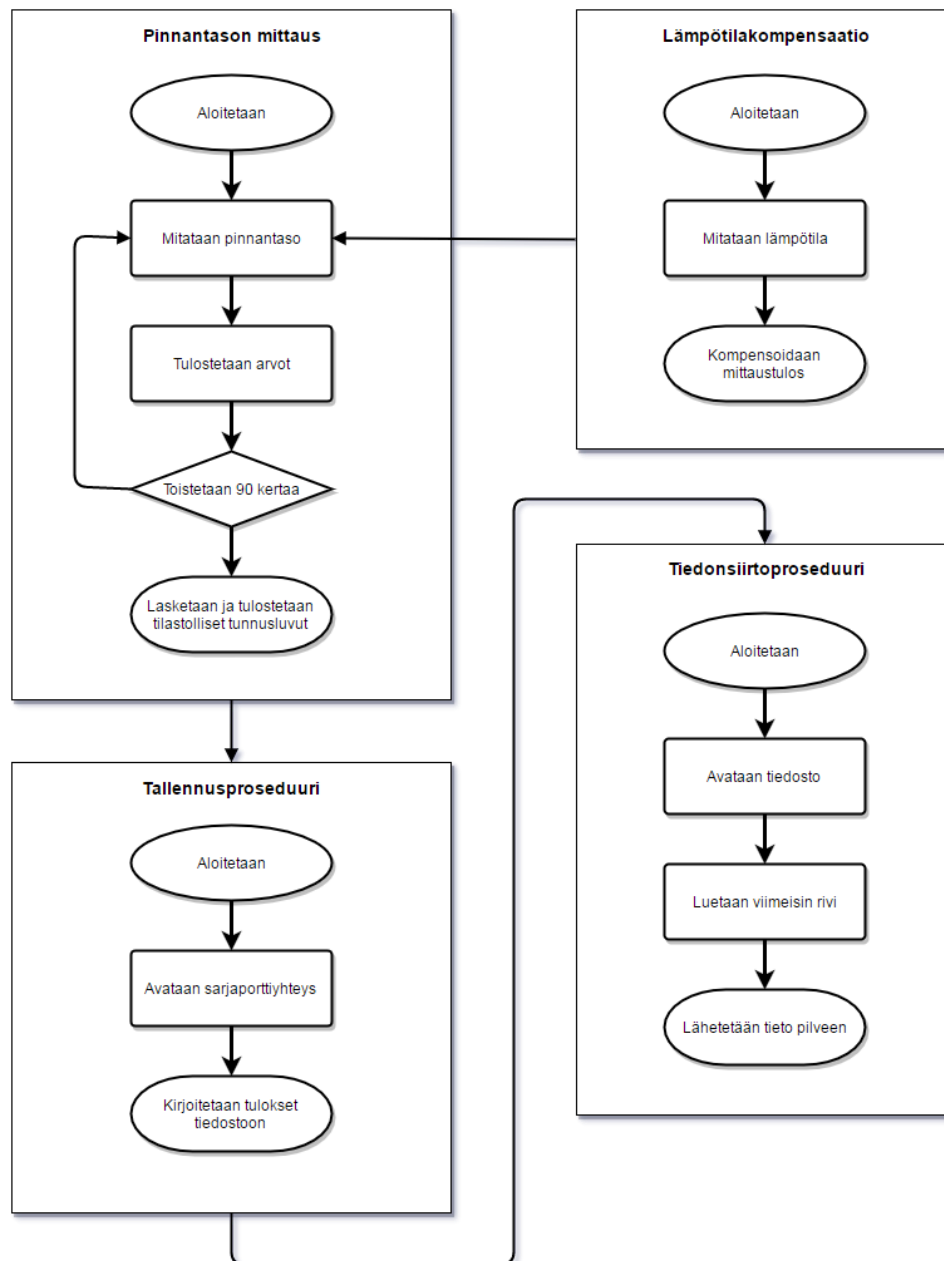
Mittausjärjestelmä on kokoelma laitteita, standardeja, toimintoja, menetelmiä, suureita, ohjelmistoja, käyttäjiä, ympäristöjä ja oletuksia. Näitä käytetään mittaustulosten määrittämisessä. Yhdysvaltalaisen matemaatikon Churchill Eisenhartin mukaan ”mittaustulokset ovat arvojen asettamista materiaalisille asioille, jotta voidaan esittää niiden välisiä suhteita” (1963). Mittausprosessia voidaan tarkastella valmistusprosessina, joka tuottaa numeerista tietoa. (MSA 2010)

4.1 Määrittely

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on suunnitella ja toteuttaa ultraäänimittausjärjestelmän prototyyppi, jonka tuloksia voidaan seurata pilvipalvelusta. Sitä voidaan jatkossa käyttää jäteveisesäiliöiden pinnantason tarkkailussa. Sen antamien tietojen perusteella voidaan päätellä, milloin säiliöt on syytä tyhjentää. Järjestelmän prototyypin tulee pystyä mittaamaan etäisyyttä 100 - 3000 millimetrin välillä 10 millimetrin tarkkuudella.

Tavoitteena oli toteuttaa järjestelmä mahdollisimman edullisista komponenteista ja tutustua uusiin teknologioihin. Ultraäänitekniikka valittiin, koska sillä voidaan mitata turvallisesti kohdetta ainetta rikkomatta, eikä mittauskohteessa tarvitse olla vastinkappaletta. Myös mittauskohteen materiaali voi olla melkein mitä vain. Ultraäänianturit ovat suhteellisen edullisia, pienikokoisia ja vähän virtaa kuluttavia. Järjestelmän komponentit ultraäänianturin ohella on tarkoitettu kokeelliseen käyttöön, mutta joissain tapauksissa soveltuvat korvaamaan kalliimpia vaihtoehtoja.

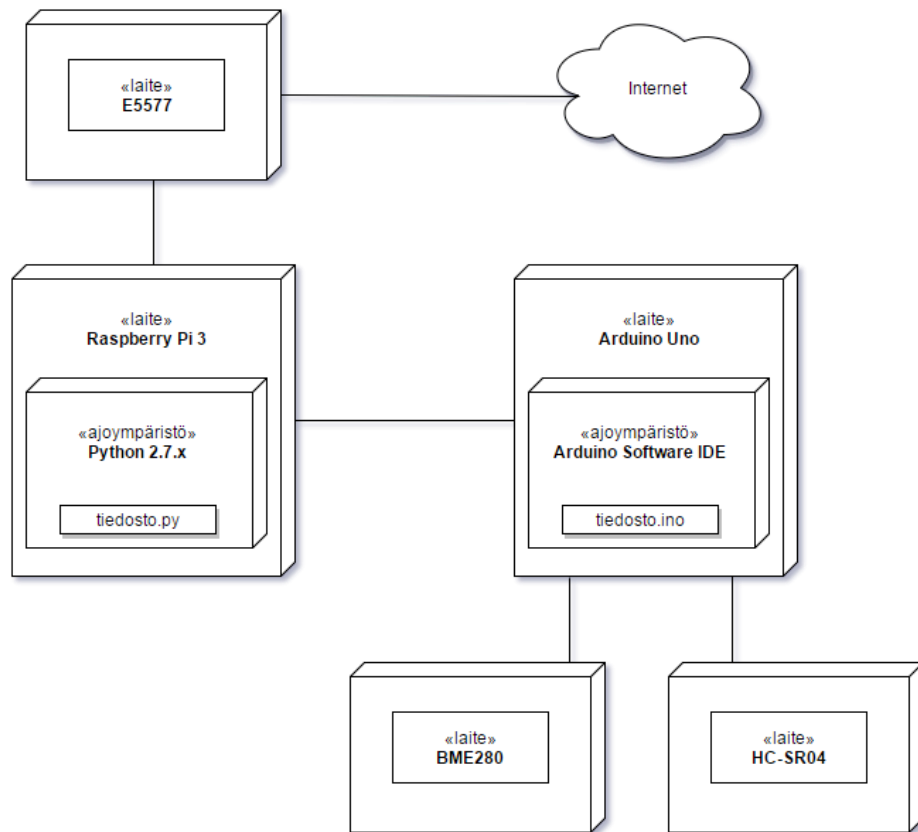
Kun prototyyppi käynnistetään, ultraäänianturi alkaa mitata etäisyyttä kohteeseen tietyin väliajoin. Järjestelmään kuuluva mikrokontrolleri käsittelee anturilta saamansa mittaus tulokset ottaen huomioon lämpötilan, joka saadaan lämpötila-anturilta. Tämä toistetaan niin monta kertaa kuin on määritelty, jonka jälkeen mittaustuloksista lasketaan tilastolliset tunnusluvut. Tietokone lukee sarjaporttiyhteyden kautta mikrokontrollerin tulostamat arvot. Tämän jälkeen se tallentaa saamansa arvot tiedostoon tai tietokantaan. Tallentamisen jälkeen tiedoston viimeisin rivi luetaan ja siirretään pilveen. Kuvassa 9 esitetään mittausjärjestelmän toimintaprosessi.



Kuva 9. Mittausjärjestelmän toimintaprosessi.

4.2 Suunnittelu

Mittausjärjestelmä koostuu mikrokontrollerista, tietokoneesta, ultraääni- ja lämpötila-anturista ja langattomasta 3G/4G-modeemista. Aiemman tutkimuksen pohjalta komponenteiksi valittiin ATmega328P-mikrokontrollerin sisältävä Arduino Uno -kehitysalusta, Raspberry Pi 3 -tietokone, HC-SR04-ultraäänianturi, BME280-anturiyksikkö ja Huawei E5577 langaton 3G/4G-modeemi. Kuvassa 10 esitetään komponenttien sijoittelukaavio suunnitellusta järjestelmästä.



Kuva 10. Sijoittelukaavio suunnitellusta järjestelmästä.

Järjestelmän komponenttien valintaan vaikutti myös niiden näkyvyys IT-alalla, edullisuus, vähäinen virrankulutus, fyysinen koko, muokattavuus ja oma kiinnostus.

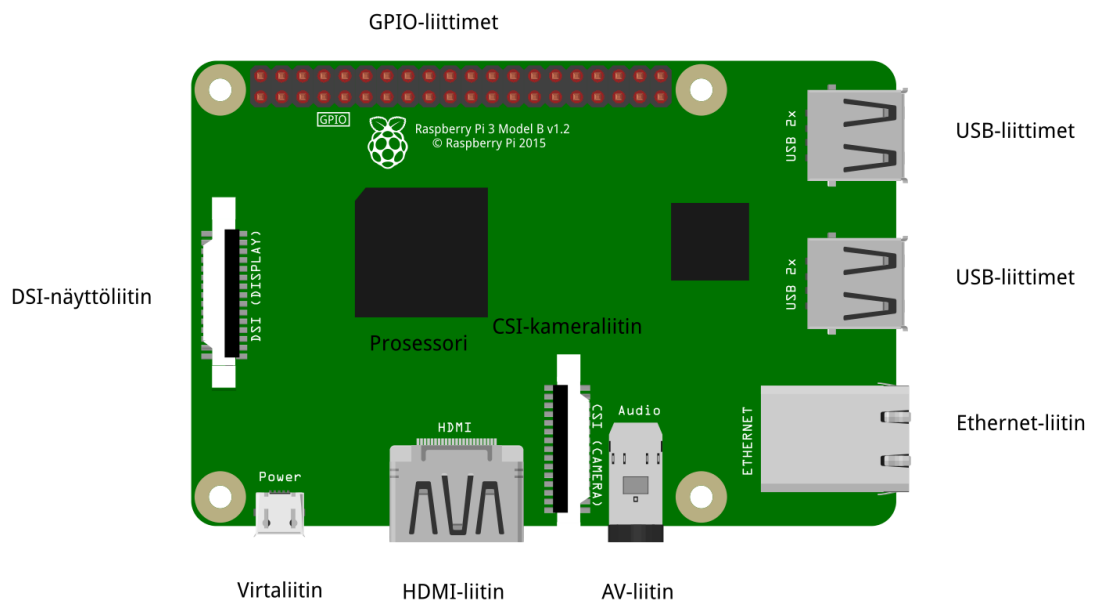
Raspberry Pi 3

Raspberry Pi on edullinen luottokortin kokoinen tietokone, jota valmistaa Raspberry Pi Foundation Iso-Britanniassa. Heidän alkuperäinen tavoitteensa on ollut luoda edullinen tietokone opetuskäyttöön, jotta koulut voisivat opettaa ohjelmointia ja näin antaa ymmärrystä tietokoneen toiminnasta. Ensimmäinen Raspberry Pi -tuote julkaistiin helmikuussa vuonna 2012. Raspberry Pi -tuoteperhe sisältää tällä hetkellä viisi tuoteversiota: Raspberry Pi A+, Raspberry Pi B+, Raspberry Pi 2, Raspberry Pi 3 ja Raspberry Pi Zero. Tässä tutkimuksessa käytetään Raspberry Pi 3 -versiota, koska se on näistä tuoteversioista tehokkain. (Dennis 2016; Upton & Halfacree 2016)

Raspberry Pi 3 sisältää Broadcomin valmistaman 64-bittisen ARM-prosessorin. Se on tyypiltään system-on-chip (SoC), joka tarjoaa tiedonkäsittelyn, graafisen renderöinnin ja IO-ominaisuudet. Muistipiiri sijaitsee piirilevyn toisella puolella ja sen tyyppi on RAM (random access memory). Raspberry Pi sisältää kolme videoulostuloa: HDMI, komposiitti ja DSI. HDMI -liitäntä tarjoaa digitaalisen videon ja äänen. AV-liitin mahdollistaa

analogisen komposiitti-liitännän sopivan adapterin avulla. Yksinään AV-liitin toimii 3.5 mm stereoääni -liitännänä. DSI-näyttöliitintä käytetään pääasiassa Raspberry Pi:n virallisen kosketusnäytön kanssa. (Upton & Halfacree 2016)

Kuvassa 11 olevassa piirilevyssä on myös neljä USB-paikkaa ja Ethernet-verkkoliitäntä. Erona aiempiin tuoteversioihin Raspberry Pi 3:ssa on sisäänrakennettu tuki 2.4 GHz langattomille Wi-Fi- ja Bluetooth -laitteille. CSI-kameraliitäntään voidaan kytkeä Raspberry Pi:n virallinen kameramoduuli. GPIO-liittimiä (general-purpose input/output) käytetään, kun halutaan kiinnittää muita laitteita Raspberry Pi:hin. Raspberry Pi 3 käyttää ulkoista virtalähdettä, joka kytketään micro-USB-liittimeen. Siinä ei ole virtakytkintä, vaan se käynnistyy heti kun virta kytketään. Piirilevyn alapuolella on myös micro-SD-kortti-paikka, joka toimii massamuistina, johon tallennetaan käyttöjärjestelmä, ohjelmat ja muut tiedostot. Taulukossa 5 ovat Raspberry Pi 3:n tekniset ominaisuudet. (Upton & Halfacree 2016)



Kuva 11. Raspberry Pi 3:n komponentit.

Taulukko 5. *Raspberry Pi 3:n tekniset ominaisuudet, muokattu lähteestä. (Raspberry 2016)*

| | |
|--------------------------|--|
| Piirisarja | Broadcom BCM2837 |
| Suoritin | 4x ARM Cortex-A53, 1.2GHz |
| Näytönohjainpiiri | Broadcom VideoCore IV |
| Keskusmuisti | 1GB LPDDR2 (900 MHz) |
| Verkkoliitännät | 10/100 Ethernet, 2.4GHz 802.11n wireless |
| Bluetooth | Bluetooth 4.1 Classic, Bluetooth Low Energy |
| Massamuisti | microSD |
| GPIO | 40-pin header, populated |
| Liitännät | HDMI, 3.5mm analogue audio-video jack, 4x USB 2.0, Ethernet, Camera Serial Interface (CSI), Display Serial Interface (DSI) |

Raspberry Pi:ssä yleisimmin käytetyt Linux-pohjaiset käyttöjärjestelmät ovat Raspbian, Ubuntu, OpenELEC ja Arch Linux. Raspbian on erityisesti Raspberry Pi:lle julkaistu versio Debian Linuxista, joka on yhteisöohjattu Linux-jakelupaketti. Debianin kehitykseen ei liity kaupallista organisaatiota, ja painotus on avoimen lähdekoodin kehityksessä. Raspbian laajentaa Debiania omilla työkaluillaan ja ohjelmistopaketeilla (esim. Java, Mathematica, Scratch). Raspbian-versioita on kahta tyyppiä: työpöytä- ja komentopohjainen. Ubuntu on Debian-pohjainen Linux-jakeluversio, joka on tehty käyttäjäystävälliseksi. Sen vahvuus on monipuolinen työpöytäkäytettävyys. OpenELEC on tarkoitettu multimediasovelluksiin kuten Kodi, jolla pystytään toteuttamaan kodin viihdekeskus. Arch Linux on kevyt ja joustava Linux-jakeluversio, joka antaa käyttäjälle täyden hallinnan ja vastuun järjestelmän konfiguroinnista. Raspberry Pi:lle on kehitetty myös muita kuin Linux-ratkaisuja kuten Windows 10 IoT Core- ja RISC OS -käyttöjärjestelmät. Niillä on kuitenkin rajoittunut laitetuki ja tiukemmat ohjelmointiympäristöt kuin Linuxissa. (Molloy 2016)

Raspberry Pi:n nimen taustalla on tietokoneyhtiöiden tapa nimetä tuotteitaan hedelmien mukaan ja Pi on väännös Python-ohjelmointikielen nimestä. Alun perin Pythonia ajateltiin sen ainoaksi ohjelmointikieleksi, mutta tänä päivänä sitä voidaan ohjelmoida millä tuetulla ohjelmointikielellä tahansa. Raspberry Pi:n kehittäjät pitävät kuitenkin Pythonia sopivimpana ohjelmointikielenä opetukseen ja kehitykseen. (Upton & Haflacree 2016)

Python

Python on moniparadigmainen (engl. multiparadigm) ohjelmointikieli, joka tarjoaa useita mahdollisuuksia luoda ohjelmia. Python toimii skriptikielenä, proseduraalisen ohjelmoinnin välineenä ja oliokielenä. Python-koodi tallennetaan py-tiedostoiksi. Skriptikielenä Pythonia käytetään suorittamaan yksinkertaisesti ohjelmakoodia. Ohjelmakoodi 1 sisältää skriptin, jossa testataan sarjaporttiyhteyttä. Proseduraalisena kielenä ohjelma voidaan

jakaa kokoelmaan funktioita, jotka kutsuvat toisiaan. Ohjelmakoodi 2:ssa on esimerkki proseduurikutsusta. Oliokielessä käytetään luokkia, perintää ja moduuleja hierarkian rakentamiseen. Ohjelmakoodi 3:ssa on esimerkki luokan käytöstä. Joustavuus mahdollistaa valinnan, mikä sopii parhaiten kuhunkin tilanteeseen. Esimerkeissä olevaa serial-kirjastoa käytetään tähän tutkimukseen liittyvän mittausjärjestelmän toteuttamisessa. (Venkitachalam 2016)

```
import serial                                # tuo kirjaston
ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB0')          # avaa sarjaporttiyhteyden
print(ser.name)                             # tulostaa osoitteen
ser.write(b'hello')                         # kirjoittaa "hello"
ser.close()                                # sulkee yhteyden
```

Ohjelmakoodi 1. Esimerkki sarjaporttiyhteyden testaamisesta.

```
import serial                                # tuo kirjaston
def serialtest():                           # määrittää proseduurin
    ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB0')      # avaa sarjaporttiyhteyden
    print(ser.name)                         # tulostaa osoitteen
    ser.write(b'hello')                    # kirjoittaa "hello"
    ser.close()                            # sulkee yhteyden

serialtest()                               # suorittaa proseduurin
```

Ohjelmakoodi 2. Esimerkki proseduurin kutsumisesta.

```
import serial                                # tuo kirjaston
class SerialTest:                           # määritetään luokka
    def __init__(self, port):               # init alustaa luokan
        self.port = port                   # asettaa arvon muuttujaan

    def serialtest(text):                   # määrittää proseduurin
        ser = serial.Serial(self.port)      # avaa sarjaporttiyhteyden
        print(ser.name)                    # tulostaa osoitteen
        ser.write(text)                    # kirjoittaa "hello"
        ser.close()                        # sulkee yhteyden

test = SerialTest('/dev/ttyUSB0')          # luodaan SerialTest-olio
test.serialtest(b'hello')                  # kutsutaan proseduuria
```

Ohjelmakoodi 3. Esimerkki luokan käytöstä.

Perinteisessä ohjelmointikielessä kuten C/C++:ssa ohjelmakoodi käännetään, jonka jälkeen käännos ajetaan. Pythonissa ohjelmakoodi ajetaan suoraan, ja Python-tulkki muuttaa ohjelmakoodin välikieleksi, jonka se sitten suorittaa. Välikielen käännoä käyttäjä ei näe. (Venkitachalam 2016)

Python on dynaaminen tyypitetty OOP-ohjelmointikieli (object-oriented-programming), joka on suunniteltu helposti opittavaksi ja ymmärrettäväksi. Dynaaminen tyypitys tarkoittaa, ettei muuttujille ei tarvitse asettaa tyyppiä, vaan muuttaja ”muistaa” tyyppinsä. Esimerkiksi jos luodaan muuttuja $x=5$, muuttuja x käyttäytyy kokonaislukuna, mutta jos myöhemmin asetetaan arvoksi $x=$ ”test”, silloin muuttuja käyttäytyy merkkijonona. Staattisesti tyypitetty ohjelmointikieli kuten C/C++ tai Java eivät salli muuttajan tyypin uudelleen määrittämistä. Dynaaminen tyypitys vaikuttaa suorituskyykyä hidastavasti. (Molloy 2016)

Python-ohjelmointikieli on suosittu Raspberry Pi:n käyttäjien keskuudessa, koska sitä pidetään yleiskäyttöisenä kielenä ja erittäin hyvänä välineenä opetuskäytössä. Mutta käyttäjien suunnatessa huomionsa kehittyneempiin sovelluksiin, on vaikea hyväksyä Pythonin suorituskyykyvajetta. Taulukossa 6 esitetään Pythonin hyviä ja huonoja puolia. (Molloy 2016)

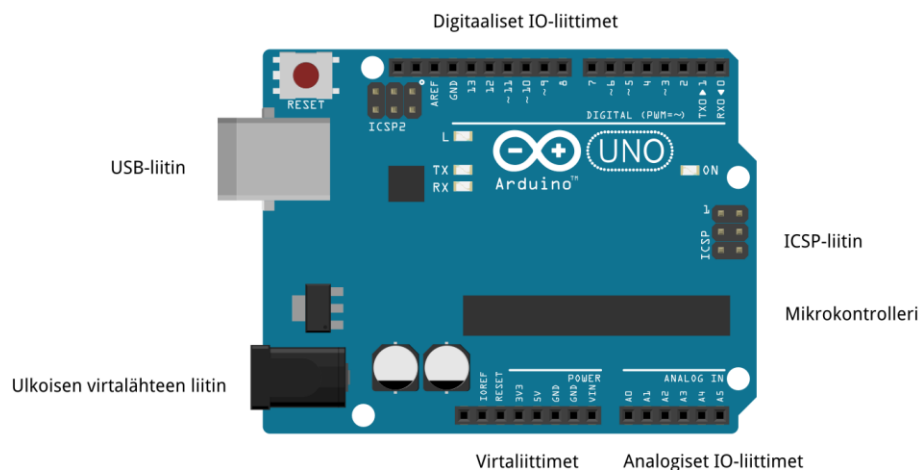
Taulukko 6. *Python-ohjelmointikielen hyvät ja huonot puolet, muokattu lähteestä. (Molloy 2016)*

| Hyvät puolet | Huonot puolet |
|--|---|
| Erittäin hyvä Linux-järjestelmätehtävien automatisoinnissa. | Suorituskyyky on heikko monimutkaisissa numeerisissa tai algoritmisissa tehtävissä. |
| Helppo muokata ja sopeutua muutoksiin. Lähdekoodi on aina muokattavissa, eikä vaadi monimutkaisia työkaluja. Oikeastaan nano on ainoa työkalu, joka tarvitaan. | Suhteellisen heikko tuki tietorakenteille, käyttöliittymille, soketeille, säikeille jne. |
| Suoraviivainen ohjelmointisyntaksi ja rakenne, jotka on helppo oppia verrattuna C++ tai Javaan. | Heikko tuki monimutkaisille sovelluksille, jotka sisältävät monia käyttäjän tekemiä moduuleita tai komponentteja. |
| Helppo testata ohjelmakoodiratkaisuja ja protoilla. | Ohjelmakoodin suora näkyvyys voi olla aineettomaan omaisuuteen tai turvallisuuteen liittyvä riski. |
| | Kehitystyökalujen puute. |

Arduino Uno

Arduino on yksinkertainen mikrokontrolleri ja avoimen lähdekoodin kehitysympäristö ohjelmoitavalle sirulle. Perustason Arduino-versioita on viisi kappaletta: Arduino Uno, Arduino 101, Arduino Pro, Arduino Pro Mini ja Arduino Micro. Näistä kolme ensimmäistä

mäistä ovat ns. tyypillisen piirilevyn Arduino-versioita ja kaksi jälkimmäistä ovat pienemmän muotokertoimen (engl. small form-factor) piirilevyjä. Kaikki Arduino-versiot sisältävät suorittimen, keskusmuistin ja IO-järjestelmän. Tässä tutkimuksessa käsitellään Arduino Uno -mallia, koska se on malleista parhaiten dokumentoitu ja toimii 5 voltin jännitteellä. Kuvassa 12 esitetään Arduino Unon komponentit kuten USB-liitin, digitaaliset sekä analogiset IO-liittimet, ICSP-liitin (engl. external programming), mikrokontrolleri, virtaliittimet ja ulkoisen virtalähteen liitin. (Arduino 2016; Venkitachalam 2016)



Kuva 12. *Arduino Unon komponentit.*

Arduinon tärkein komponentti on AVR-mikrokontrollerisiru. Uno-mallissa sirun malli on ATmega328P, joka sisältää suorittimen, ajastimet/laskurit, analogiset sekä digitaaliset pinnit, muistimoduulit ja kellomoduulin. Suoritin ajaa ohjelmakoodin, joka on ajettu muistiin Arduino IDE (Integrated Development Environment) -kehitysympäristön kautta. Ajastin/laskurimoduulia voidaan käyttää jaksollisten tapahtumien luomisessa. Esimerkiksi digitaalisten pinnien arvo voidaan tarkastaa kerran sekunnissa. Analogiset pinnit käyttävät ADC-moduulia kääntääkseen sisään tulevat analogiset signaalit digitaalisiksi arvoiksi. Arduinot sisältävät käynnistyslataajan (engl. bootloader), joka antaa mahdollisuuden ladata ja suorittaa ohjelmakoodia mikrokontrollerissa. Jos Arduinossa ei ole käynnistyslataajaa, tarvitaan ICSP-liitintä kommunikoidaan mikrokontrollerin kanssa. Arduinoa on helppo ohjelmoida suoraan tietokoneen USB-portin avulla. Ohjelmakoodi ajetaan mikrokontrollerille Arduino IDE-ohjelman avulla. Taulukossa 7 ovat Arduino Unon tekniset ominaisuudet. (Venkitachalam 2016)

Taulukko 7. *Arduino Unon tekniset ominaisuudet, muokattu lähteestä. (Arduino 2016)*

| | |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| Mikrokontrolleri | ATmega328P |
| Käyttöjännite | 5V |
| Syöttöjännite (suositus) | 7-12V |
| Syöttöjännite (toiminta-alue) | 6-20V |
| Digitaaliset pinnit | 14 (joista, kuusi PWM-ohjattua) |
| PWM digitaaliset pinnit | 6 |
| Analogiset pinnit | 6 |
| Tasavirta per I/O pinni | 20 mA |
| Tasavirta 3.3V pinniä kohden | 50 mA |
| Flash-muisti | 32 kt (ATmega328P) |
| SRAM | 2 kt (ATmega328P) |
| EEPROM | 1 kt (ATmega328P) |
| Kellotaajuus | 16 MHz |
| Pituus | 68,6 mm |
| Leveys | 53,4 mm |
| Paino | 25 g |

Arduino Unoon voidaan syöttää virtaa USB-virtalähteen tai ulkoisen virtalähteen kautta. Ulkoinen virtalähde voi olla paristo tai verkkovirta. Arduino Uno toimii ulkoisen virtalähteen kanssa jännitealueella 6-20 voltia. Arduino Unon toiminta muuttuu epävakaaksi, jos jännite laskee alle 7 voltin tai nousee yli 12 voltin. Liian suuri jännite voi aiheuttaa ylikuumenemista ja vahingoittaa laitetta. Arduino Unossa on 5 voltin jänniteregulaattori, joka toimii alueella 7-12V ja muuttaa verkkovirrasta tulevan jännitteen 5 voltiksi. Se on melko suurikokoinen pintakomponentiksi, koska sen täytyy pystyä johtamaan lämpöä pois käytettäessä suurta virtaa. (Monk 2016; Arduino 2016)

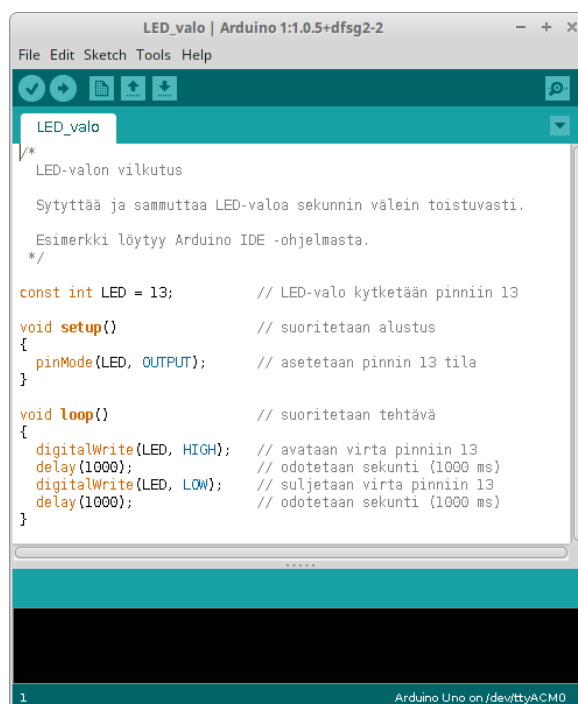
Arduinossa on Reset-, Vin-, 5V-, 3V3-, GND- ja IOREF -virtaliittimet. Reset-virtaliitintä käytetään samaan tapaan kuin PC-tietokoneessa. Käytettäessä Reset-virtaliitintä jännite laskee tilapäisesti 0 volttiin. Vin-virtaliitintä käytetään ulkoisen virtalähteen kanssa. USB-liitin käyttää automaattisesti 5 voltin säänneltyä jännitettä. 3V3 -virtaliitin käyttää jänniteregulaattoria, jolloin virta on maksimissaan 50 milliampeeria. GND-virtaliitin on referenssijännitetaso, jolla turvataan Arduinon sähköturvallisuus. IOREF-virtaliitin tarjoaa jännitelähteen esimerkiksi Arduino Ethernet Shield -lisäosalle. Se osaa lukea IOREF-virtaliittimeltä saamansa jännitteen ja valita sopivan virtalähteen. (Monk 2016; Arduino 2016)

Arduino Uno sisältää 14 digitaalista IO-liitintä, joita voidaan käyttää joko sisäänmeno- tai ulostulotarkoituksissa käyttämällä pinMode()-, digitalWrite() ja digitalRead() -funktioita. Kaksi ensimmäistä IO-liitintä (0 ja 1) on tarkoitettu tiedon vastaanottamiseen ja lä-

hettämiseen. Liittimet on myös merkitty RX- ja TX -merkinnöillä ja niitä käytetään tiedonsiirtoon tietokoneen ja Arduinon välillä USB-väylän kautta. IO-liittimet toimivat 5 voltilla. Jokainen liitin voi antaa tai vastaanottaa suositusten mukaan 20 milliampeeria ja niissä on 20 - 50 kilo-ohmin sisäinen ylösvetovastus (engl. pull-up resistor). Virran ylitäessä 40 milliampeeria laite voi vaurioitua. 40 milliampeeria 5 voltilla riittää sytyttämään LED-valon, mutta ei käyttämään suoraan sähkömoottoria. (Monk 2016; Arduino 2016)

Arduino Uno sisältää kuusi analogista sisäänmenoliitintä, jotka on merkitty A0 - A5. Ne mittaavat niihin kytkettyä jännitettä, jotta niiden arvoja voidaan käyttää ohjelmakoodissa. Vaikka sisäänmenoliittimet on nimetty analogiksi, voidaan niitä käyttää myös digitaalisina sisäänmenoina ja ulostuloina. (Monk 2016; Arduino 2016)

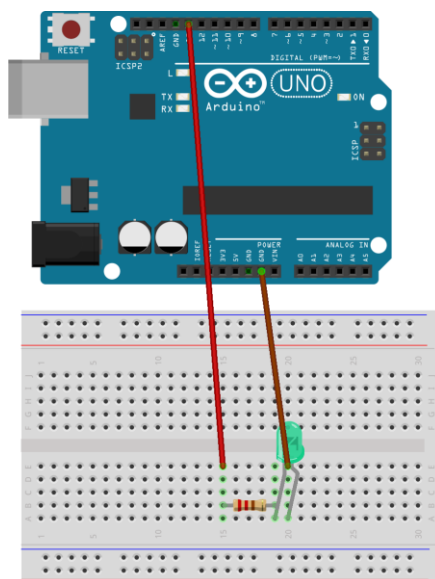
Arduinon ohjelmointikieli on lähtöisin Processing- ja Wiring -ohjelmointikielistä. Se on suunniteltu helpoksi ohjelmointikieleksi, jotta aloittamiskynnys olisi mahdollisimman matala. Arduinon ohjelmakoodia kutsutaan sketsiksi (engl. sketches), jotka tallennetaan ino-tiedostoiksi. Kuvassa 13 on esimerkki sketsistä Arduino IDE -kehitysympäristössä. Sketsi on muunnelma Arduino IDE -kehitysympäristön esimerkkikoodista ”Blink”. (Venkitachalam 2016)



Kuva 13. Esimerkki sketsistä Arduino IDE -kehitysympäristössä.

Sketsin rakenne koostuu setup()- ja loop() -funktioista. Setup()-funktioita kutsutaan sketsin alussa alustamaan muun muassa muuttujia. Se suoritetaan vain kerran Arduinon jo-

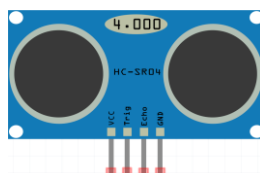
kaisen käynnistykseen tai resetoinnin yhteydessä. Esimerkiksi kuvan 13 sketsissä alustetaan pinni 13 pinMode()-funktiolla OUTPUT-tilaan, joka tarkoittaa virran antoa Arduinolta LED-valolle. Loop()-funktio suorittaa tehtävää niin kauan kuin Arduinoon on kytketty virta. Kuvassa 13 loop()-funktioon on asetettu tehtävä, jossa avataan virta pinniin 13 ja odotetaan sekunti, jonka jälkeen suljetaan virta pinniin 13 ja odotetaan sekunti. Tämä toimenpide vilkuttaa LED-valoa toistuvasti. Kuvassa 14 esitetään LED-valoesimerkin kytkennät. (Arduino 2016)



Kuva 14. *Arduino Uno on kytketty LED-valo ja 220 ohmin vastus.*

HC-SR04-ultraäänianturi

HC-SR04-ultraäänianturia (kuva 15) käytetään etäisyyksien mittaamiseen ilman fyysistä yhteyttä. Sen toimintaetäisyys on 20 - 4000 millimetriä ja mittaustarkkuus 3 millimetriä. Anturi koostuu kolmesta osasta: ohjauspiiristä (engl. control circuit), ultraäänilähettäjästä (engl. ultrasonic transmitter) ja -vastaanottajasta (engl. ultrasonic receiver). Taulukossa 8 esitetään HC-SR04-ultraäänianturin tekniset ominaisuudet. (ElecFreaks 2016)

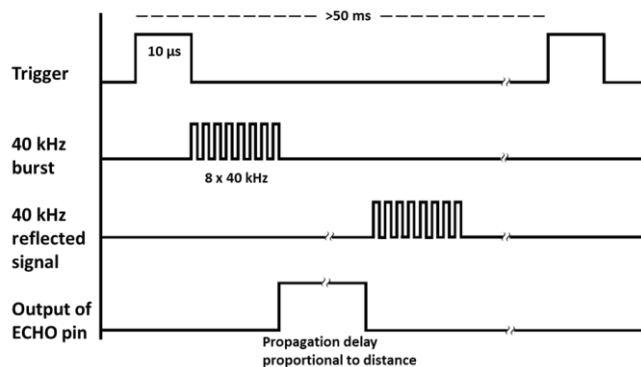


Kuva 15. *HC-SR04-ultraäänianturi.*

Taulukko 8. HC-SR04-ultraäänianturin tekniset ominaisuudet, muokattu lähteestä.
(Elecfreaks 2016)

| | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Käyttöjännite | DC 5V |
| Käyttövirta | 15 mA |
| Käyttötaajuus | 40 kHz |
| Maksimietäisyys | 4000 mm |
| Minimietäisyys | 20 mm |
| Mittauskulma | 15 astetta |
| Input Trigger -signaali | 10 μ s TTL plus |
| Output Echo -signaali | TTL-signaali, riippuu etäisyydestä. |
| Mitat | 45x25x15 mm |

HC-SR04-ultraäänianturi on edullinen ja helppo menetelmä etäisyyksien mittaamiseen. Sillä voidaan suorittaa mittauksia liikkuvien tai paikallaan olevien kohteiden välillä. Anturissa on neljä pinniä: VCC, Trig, Echo ja GND. VCC- ja GND-pinnien tehtävänä on toimia virtaliittiminä. Ohjauspiiri muodostaa signaalin, jonka se välittää ultraäänilähettäjään. Kun Trig-pinni saa 5 voltin sysäyksen vähintään 10 mikrosekunnin ajan, anturi aktivoituu. Aktivoituessaan anturi lähettää 8 jakson purskeen ultraääniaaltoja 40 kHz:n taajuudella ja odottaa takaisinheijastuvaa pursketta. Lähettäjistä signaali etenee äänennopeudella, jonka jälkeen se heijastuu kohteesta ultraäänivastaanottajaan. Kun vastaanottaja havaitsee ultraääniaaltoja, se asettaa Echo-pinnin 5 voltin tilaan ja odottaa aallon loppumista. Etäisyys voidaan laskea lähettävän Trig-signaalin ja vastaanottavan Echo-signaalin aikaeron perusteella. Ohjauspiiri käsittelee vastaanotetun signaalin ja laskee etäisyyden. Seuraava purske voidaan lähettää, kun kaiku (engl. echo) on hälvennyt. Kulkuajan (engl. time-of-flight) suositeltu kesto on alle 50 millisekuntia. Kuvassa 16 esitetään, kun Trig-pinnin jännite aktivoi muuttimen, joka lähettää ultraäänipulssin kohteelle ja takaisin Echo-pinnille. (Saraswati et al. 2012; Verma 2014)



Kuva 16. Signaalin kulku. (Marlin P. Jones & Assoc. Inc. 2016)

BME280-anturiyksikkö

Boschin valmistama BME280-anturiyksikkö mittaa ympäristöolosuhteita. Se on kehitetty mobiilisovelluksiin, joissa fyysinen koko ja alhainen virrankulutus ovat tärkeimpiä ominaisuuksia. Yksikössä on korkeatarkkuuksiset lämpötila-, kosteus- ja ilmanpaineanturit kiinnitettynä 8-pinniseen LGA-pakattuun 2,5 x 2,5 x 0,93 mm metallikuoreen. Pienen kokonsa ja virrankulutuksensa ansiosta yksikkö sopii paristokäyttöisiin laitteisiin kuten mobiililaitteisiin, GPS-moduuleihin ja kelloihin. Yksikön käyttökohteita ovat mm. koti-automaatiojärjestelmät, hyvinvointiteknologia, sääolojen tarkkailu ja ilmastointijärjestelmät. (Bosch 2016)

BME280-anturiyksikkö sisältää neljä erilaista pinniä: Vin, GND, SCL ja SDA. Vin-pinniä käytetään virransyöttöön. Piirilevyllä voidaan syöttää jännitettä 3 - 5 voltia, mutta sen jänniteregulaattori säätelee jännitteen 3 volttiin. GND-pinni on maadoitusliitin. SCL-pinni määrittää tiedonsiirron synkronoinnin. SDA-pinniä käytetään tiedonsiirrossa, kun dataa lähetetään anturilta mikrokontrollerille. Sen sijaan SDA-pinniä käytetään liikennöintiin prosessorilta anturille. Kuvassa 17 on BME280-anturiyksikkö kiinnitettynä piirilevyyn. (Adafruit 2016)



Kuva 17. BME280-anturiyksikkö kiinnitettynä piirilevyyn. (<https://ikmaak.nl/een-blog/wp-content/uploads/2016/04/BME280.jpg>)

Valmistajan mukaan lämpötila-anturin tarkkuus on $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$, kosteusanturin $\pm 3\%$ ja ilmanpaine-anturin $\pm 1\text{ hPa}$. Yksikössä on SPI- ja I²C-liitännät, jotka toimivat 3,3 voltin tai 5 voltin jännitteellä. Mittaukset kuluttavat alle 1 milliampeeria ja lepotilassa alle 5 mikroampeeria. Taulukossa 9 on BME280-anturiyksikön tekniset ominaisuudet. (Adafruit 2016)

Taulukko 9. BME280-anturiyksikön tekniset ominaisuudet, muokattu lähteestä. (Adafruit 2016)

| | |
|-------------------------------------|--|
| Koko | 2,5 x 2,5 x 0,93 mm |
| Toiminta-alue | Lämpötila: -40 - +85 °C Kosteus: 0 - 100 % Ilmanpaine: 300 - 1100 hPa |
| Virransyöttö | 1,2 - 3,6 V |
| Liitännät | I ² C ja SPI |
| Keskimääräinen virrankulutus | 1,8 µA (lämpötila ja kosteus) 2,8 µA (ilmanpaine ja lämpötila) 3,8 µA (lämpötila, kosteus ja ilmanpaine) |
| Virrankulutus lepotilassa | 0,1 µA |

E5377-modeemi

Huawei E5377 on 2G-, 3G- ja 4G -matkapuhelinverkoissa toimiva langaton modeemi, joka mahdollistaa pääsyn Internetiin. Laitteessa on mahdollisuus luoda WLAN-verkko, joko 2,4 GHz:n tai 5 GHz:n taajuudella. Sillä voi olla maksimissaan 15 käyttäjää. 4G LTE -verkossa enimmäisnopeus on 150Mbit/s. Kuvassa 18 on Huawei E5377. Taulukossa 10 on laitteen tekniset tiedot. (Huawei 2016)



Kuva 18. Huawei E5377. (Huawei 2016)

Taulukko 10. Huawei E5377-laitteen tekniset tiedot, muokattu lähteestä. (Huawei 2016)

| | |
|---------------------------|--|
| Tekninen standardi | WAN: LTE FDD/DC-HSPA+/HSPA+/HSPA/UMTS/EDGE/GPRS/GSM |
| Toimintataajuus | WLAN: IEEE 802.11a/b/g/n LTE FDD: 2600/2100/1800/900/800/850 MHz DC-HSPA+/HSPA+/HSPA/UMTS: 2100/1900/900/850 MHz EDGE/GPRS/GSM: 1900/1800/900/850 MHz WLAN: 2.4 GHz, 5 GHz |
| Sisäinen muisti | 128 MB Flash, 128 MB DDR SDRAM |
| WLAN-nopeus | 802.11a: 54 Mbit/s asti 802.11b: 11 Mbit/s asti 802.11g: 54 Mbit/s asti 802.11n: 300 Mbit/s asti |
| Virrankulutus | 3.5 W |
| Akku | Tyyppi: Li (ladattava) Kapasiteetti: 3.7 V, 3560 mAh Maksimitoiminta-aika: 12 tuntia (riippuen verkosta) Maksimivalmiusaika: 500 tuntia (riippuen verkosta) |
| Ulkoiset liitännät | Micro USB -liitäntä microSD-korttiliitäntä SIM-korttiliitäntä |
| Koko | 95.0 mm×57.1 mm×20.0 mm noin 136 g (sisältäen akun) |

E5377-modeemilla pystytään kirjoittamaan, lähettämään ja vastaanottamaan SMS-viestejä. Yhteyden muodostaminen 2G/3G/4G-verkkoon tapahtuu APN (Access Point Name) -hallinnan kautta. WLAN-asetuksista löytyy tuki sekä 64/128-bitin WEP-, 256-bitin WPA-PSK- ja WPA2-PSK -salauksille että TKIP- ja AES -algoritmeille. Modeemissa on myös sisäänrakennettu palomuuuri NAT-tekniikalla ja DHCP-palvelin. (Huawei 2016)

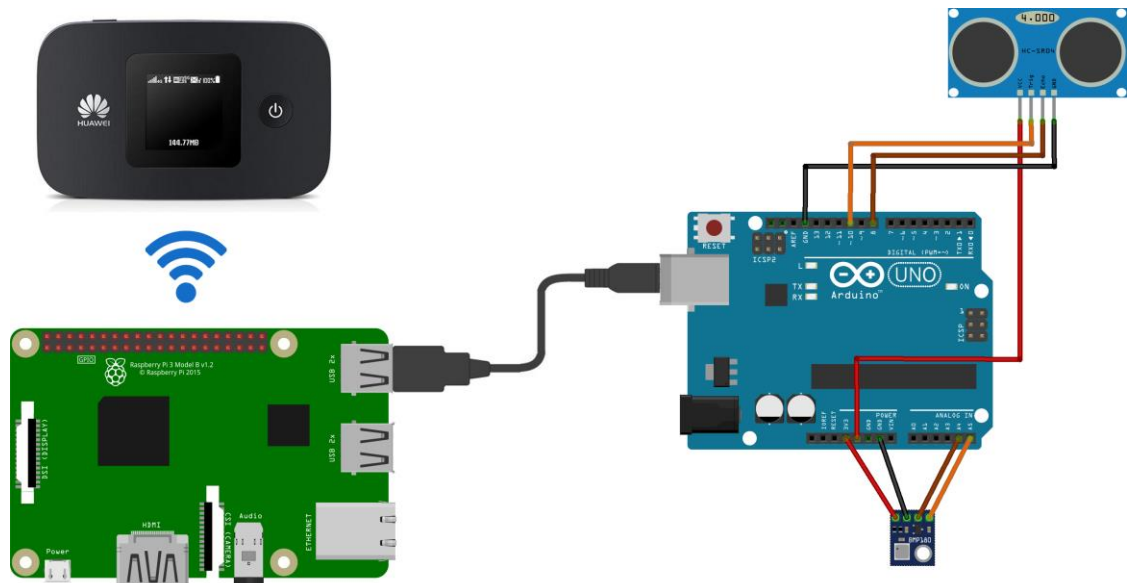
4.3 Toteutus

Mittausjärjestelmän komponentteja on hyvin saatavissa IT-, sähkö-, elektroniikka- ja automaatioalan verkkokaupoista. Arduino Uno -mikrokontrolleria ja Raspberry Pi 3 -tietokonetta löytyy yleensä suoraan varastosta, mutta antureita voi joutua odottelemaan. Tässä tutkimuksessa käytettiin suomalaisia verkkokauppoja komponenttien hankinnassa. Alla olevassa taulukossa 11 esitetään järjestelmän osaluettelo hintoineen ja ostopaikkoineen.

Taulukko 11. Järjestelmän osaluettelo.

| Komponentti | Hinta euroina (ALV 0 %) | Saatavilla |
|-----------------------------------|-------------------------|---|
| Arduino Uno Rev3 | 24,00 | http://yeint.fi |
| Raspberry Pi 3 | 39,00 | http://yeint.fi |
| HC-SR04-ultraäänianturi | 4,52 | http://www.elektroniikkaosat.com |
| BME280-anturiyksikkö | 12,12 | http://www.elektroniikkaosat.com |
| Dupont-johtolajitelma uros-naaras | 3,00 | http://www.elektroniikkaosat.com |
| Raspberry Pi 3 -virtalähde | 8,90 | http://yeint.fi |
| Kingston 16 GB microSD-kortti | 7,00 | http://yeint.fi |
| USB-johto 1 m | 2,70 | http://yeint.fi |
| Huawei E5377 -modeemi | 54,00 | http://www.dna.fi |
| Kokonaishinta | 155,24 | |

Järjestelmän kokoaminen aloitetaan kytkennöillä. Arduino Unoon kytketään HC-SR04-ultraäänianturi ja BME280-anturiyksikkö Dupont-kytkentäjohtoilla. Ultraäänianturin VCC-pinni kytketään Arduino Unon 5 voltin liitimeen, Trig-pinni digitaaliseen liitimeen numero 10, Echo-pinni digitaaliseen liitimeen numero 8 ja GND-pinni GND-liitimeen. BME280-anturiyksikön VIN-pinni kytketään 3,3 voltin liitimeen, GND-pinni GND-liitimeen, SCL-pinni analogiseen liitimeen A4 ja SDA-pinni analogiseen liitimeen A5. Arduino Uno kytketään Raspberry Pi 3:een USB-kaapelilla, jossa Arduino Unon päässä on USB/A-liitin ja Raspberry Pi 3:n päässä USB/B-liitin. Raspberry Pi 3:n ja Huawei E5377-modeemin välillä on langaton WLAN-yhteys. Kuvassa 19 esitetään järjestelmän kytkennät ja yhteydet.



Kuva 19. Järjestelmän kytkennät ja yhteydet.

Raspberry Pi 3 -tietokoneeseen asennetaan Raspbian-käyttöjärjestelmän työpöytäversio. Asennuksen jälkeen on suositeltavaa päivittää Raspbian-käyttöjärjestelmä ja pakettivaraosat kuten esimerkiksi python-serial-kirjasto, joka mahdollistaa sarjaporttiyhteyden käyttämisen Arduino Unon kanssa. Lisäksi asennetaan Arduino IDE -kehitysympäristö sekä tarvittavat NewPing-, BME280- ja QuickStats -kirjastot.

NewPing-kirjastossa on ajureita monille eri ultraääniantureille mukaan lukien HC-SR04. Ajurit sisältävät anturin toimintaa ohjaavan ohjelmakoodin. NewPing-kirjaston on luonut Tim Eckel, joka havaitsi Arduinon IDE:n pulseIn-funktiossa olevan parannettavaa. Eckelin luoma kirjasto parantaa seuraavia ominaisuuksia: ei vaadi sekunnin viivettä mittausten välillä, pystyy mittaamaan luotettavasti 30 kertaa sekunnissa, suorittaa mittaukset tehokkaammin ja vähemmällä ohjelmakoodilla eikä käytä pulseIn-funktiota. Ohjelmakoodi on vapaasti käytettävissä ja muokattavissa, mutta omat toteutukset on pidättävä erillään alkuperäisestä versiohallinnan haarasta. Eckel käyttää Atlassian Bitbucket -versionhallintajärjestelmää. (Eckel 2016)

BME280 on ohjelmakirjasto Boschin valmistamaa BME280-anturiyksikköä varten. Se lukee lämpötila-, kosteus- ja painearvoja sekä korkeuden ja kastepisteen. Se tarjoaa funktiot sekä maili- että metrijärjestelmälle. BME280-kirjaston on luonut Tyler Glenn, joka halusi kyseisen anturin toimivan Arduinossa. Ohjelmakoodi noudattaa GNU GPL -lisenssiä (General Public License), joka antaa oikeuden käyttää, kopioida, muuttaa ja jakaa edelleen ohjelmia ja niiden lähdekoodia. Glenn käyttää GitHub-versionhallintajärjestelmää ja ohjeistaa miten ohjelmakirjaston kehittämiseen voi osallistua. (Glenn 2016)

QuickStats-kirjasto on kokoelma tilastollisten tunnuslukujen laskemiseen käytettäviä funktioita. Se sisältää funktiot otoksen keskiarvon, minimin, maksimin, keskihajonnan, keskivirheen, variaatiokertoimen, mediaanin ja moodin laskemiseen. Sen on luonut David Dubins, koska Arduino IDE:ssä ei ole kyseisiä funktioita. Dubins käyttää GitHub-versionhallintajärjestelmää kirjaston jakamiseen ja päivittämiseen. Taulukossa 12 esitetään järjestelmän ohjelmistoluettelo. (Dubins 2016)

Taulukko 12. Järjestelmän ohjelmistoluettelo.

| Ohjelmisto | Saatavilla |
|------------------------------------|---|
| Arduino IDE -kehitysympäristö | https://www.arduino.cc/en/Main/Software |
| Raspbian Jessie -käyttöjärjestelmä | https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/ |
| Python-serial-kirjasto | sisältyy Raspbian-käyttöjärjestelmään |
| NewPing-kirjasto | https://bitbucket.org/teckel12/arduino-new/ping/wiki/Home |
| BME280-kirjasto | https://github.com/finitespace/BME280 |
| QuickStats-kirjasto | https://github.com/dndubins/QuickStats |

Mittaamisen suorittava logiikka ohjelmoidaan Arduino IDE:llä ino-tiedostoon. Ohjelma-koodissa tarkistetaan, että BME280-anturiyksikkö on kytketty. BME280-kirjasto sisältää tätä varten begin()-metodin. Jos se palauttaa true-arvon, niin voidaan suorittaa mittaustuloksen lämpötilakompensaatio. False-arvolla mittausta tehdään joka tapauksessa mutta ilman kompensatiota. BME280-kirjastossa on myös metodi read(), jolle välitetään parametreina liukulukutyypiset muuttujat, joihin se lukee ilmanpaineen, lämpötilan ja kosteuden. Lisäksi metodilla on parametrit, jotka kertovat käytetäänkö metri- vai mailijärjestelmän mukaisia yksiköitä sekä missä yksikössä ilmanpaine esitetään.

NewPing-kirjastossa on ping()-metodi, joka palauttaa mittaukseen kuluneen ajan mikrosekunteina. Kulunut aika määrittää etäisyyden mitattavaan kohteeseen. Laskutoimituksessa käytettävät kaavat esitetään luvussa 2.4.

QuickStats-kirjastoa käytetään laskettaessa mitatuista arvoista tilastollisia tunnuslukuja. Kirjaston metodeille välitetään parametreina mittaustulokset taulukossa sekä mittauserojen määrä. Nämä mittaustulokset välitetään sarjaporttiin Serial.print()-metodilla.

Tiedon lukemiseen, tallentamiseen ja välittämiseen käytetään Python-koodia, joka suoritetaan Raspberry Pi 3 -tietokoneessa. Edellä olevat tehtävät on jaettu kahteen py-tiedostoon. Tiedon lukemiseen ja tallentamiseen on oma tiedostonsa sekä välittämiseen omansa. Ensiksi mainitun tehtävä on lukea sarjaporttiyhteyttä ja tallentaa sieltä saadut mittaustulokset tiedostoon. Toinen tiedosto lukee tiedosta viimeisen rivin, jonka se lähettää pilvipalveluun.

5 TULOSTEN ANALYSOINTI

Mittausta ei voida suorittaa absoluuttisen tarkasti, vaan mittaustulos on aina arvio mitattavasta arvosta. Mittaustuloksen ja mitattavan arvon ero on mittausvirhe. Mittausvirheet voidaan jaotella karkeisiin, systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin. Karkeita virheitä syntyy, jos mitta-asteikko luetaan väärin, mittalaitteeseen tulee toimintahäiriö tai tietojen tallennuksessa tapahtuu virhe. Mittaustuloksia ei saa hylätä, jos mittaajalla ei ole selvää käsitystä siitä, mistä poikkeava arvo saattaa johtua. Systemaattinen virhe tarkoittaa virhettä, joka johtuu käytetystä mittalaitteesta tai mittaamenetelmästä. Virhe pysyy samana tai muuttuu säännönmukaisella tavalla, mikä voidaan korjata kalibroimalla mittalaite. Osa systemaattisesta virheestä voi olla tunnettua. Satunnainen eli tilastollinen virhe on mitauksissa aina mukana. Se aiheutuu useista riippumattomista tekijöistä ja on usein normaalijakautunutta. Kokeellisissa tutkimuksissa satunnaiselle mittausvirheelle voidaan laskea arvio. (Keinänen & Järvinen 2014; TKK 2004)

5.1 Mittausepävarmuus

Mittausepävarmuus on mittaustuloksen laadun kvantitatiivinen arvio, jonka avulla on mahdollista verrata mittaustulosta toisiin tuloksiin, spesifikaatioihin tai mittanormaaleihin. Jokaisella yksittäisellä mittaustuloksella on tietty virheensä, jolla se eroaa mittaustuloksen todellisesta arvosta. Useimmat mittausten virhelähteet voidaan tunnistaa. Mittaustulosten yhteydessä käytetään mittausepävarmuutta, joka kuvaa saatujen tulosten oletettua vaihtelua. (Howarth & Redgrave 2008)

Mittausepävarmuus voidaan määrittää monella eri tavalla. Yleisin ja kansainvälisen standardoimisjärjestön ISON (International Organization for Standardization) suosittelema menetelmä löytyy ”Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”-oppaasta. Se on yleisesti hyväksytty mittaustalon de-facto-standardiksi. (Howarth & Redgrave 2008)

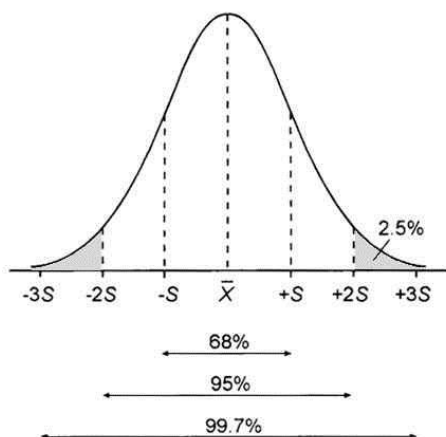
Epävarmuusanalyysin kulku voidaan pääpiirteissään esittää seuraavasti (Hiltunen et al. 2011):

1. Esitetään matemaattisesti mittaussuureen riippuvuus lähtösuureista.
2. Identifioidaan ja tehdään merkittävät korjaukset.
3. Luetteloidaan epävarmuuslähteet.
4. Lasketaan standardiepävarmuus toistettavasti mitatuille suureille (tyypin A epävarmuudet).
5. Arvioidaan tyypin B epävarmuudet muilla keinoilla.
6. Lasketaan epävarmuuskomponenttien vaikutukset mittaussuureen epävarmuuteen.

7. Lasketaan saadut epävarmuuskomponentit neliöllisesti yhteen, mistä saadaan yhdistetty standardiepävarmuus u_c .
8. Lasketaan laajennettu epävarmuus U kertomalla yhdistetty standardiepävarmuus u_c halutulla kattavuuskertoimella k . Yleensä käytetään arvoa $k = 2$, mikä johtaa 95 % kattavuusväliin.

Usein puhutaan epävarmuusanalyysin yhteydessä virheellisesti mittausvirheistä ja virhearviosta. Epävarmuusanalyysin yhteydessä virheet kuitenkin korjataan, ja korjausten epävarmuudet sisällytetään epävarmuuslaskelmaan. Menettelystä kannattaa huomata, että toisistaan riippumattomat epävarmuuskomponentit summataan yhteen neliöllisesti. Tällöin ne eivät voi kumota toisiaan, koska yhteenlaskettavat ovat aina positiivisia lukuja. (Hiltunen et al. 2011)

Epävarmuutta laskettaessa yksittäisistä epävarmuuskomponenteista on tunnettava jakaumat. Normaalijakaumassa mittaustulokset jakautuvat siten, että jakauman keskikohta \bar{x} on todennäköisin. Mittaustuloksen todennäköisyys pienenee sitä mukaa, kun etäännyttään jakauman keskikohdasta. Normaalijakaumaa kuvaavat jakauman keskiarvo \bar{x} ja jakauman keskihajonta $s(x)$. Mittaustuloksista 68 % sijaitsee välillä $\bar{x} \pm s(x)$ ja 95 % sijaitsee välillä $\bar{x} \pm 2s(x)$. Kuvassa 20 esitetään normaalijakauma. Mikäli komponentin jakaumaa ei tunneta, oletetaan se usein normaalijakautuneeksi. Toistettujen mittausten jakauma noudattaa hyvin usein normaalijakaumaa. Samoin epävarmuus, joka saadaan usean epävarmuuskomponentin yhdistelmänä, noudattaa normaalijakaumaa olivatpa lähtösuureiden jakaumat mitä tahansa. (Hiltunen et al. 2011)



Kuva 20. Normaalijakauma. (FAO 2017)

Toinen usein esiintyvä jakauma on tasajakauma. Digitaalisen mittalaitteen resoluutiosta aiheuttava epävarmuus on hyvä esimerkki tasajakaumasta. Myös omaan arvioon perustuvat arviot voidaan ajatella tasajakautuneiksi. Tasajakaumasta saadaan hajonta jakamalla vaihteluvälin puolikas a tekijällä $\sqrt{3} \approx 1,7$. Kokonaisvaihteluväli taas jaetaan tekijällä $2\sqrt{3}$. (Hiltunen et al. 2011)

Epävarmuusanalyysissä käsitellään yksittäisiä epävarmuuskomponentteja yksinkertaisten hajontojen tasolla. Tällaista epävarmuuskomponenttia, jonka todennäköisyys on 68 %, kutsutaan standardiepävarmuudeksi. Kun halutaan esimerkiksi 95 % todennäköisyyttä, kerrotaan se kattavuuskertoimella $k = 2$. (Hiltunen et al. 2011)

Mittausepävarmuuksien määrittystavat voidaan jakaa kahteen luokkaan:

1. Tyypin A mukainen epävarmuuden määrittäminen: ”Epävarmuus, joka voidaan määrittää tilastollisin menetelmin.”
2. Tyypin B mukainen epävarmuuden määrittäminen: ”Epävarmuus, jota ei voida määrittää tilastollisin menetelmin.”

Toistettaville mittauksille suoritetaan tyypin A epävarmuusanalyysi tilastollisia menetelmiä käyttäen (Hiltunen et al. 2011). Olkoot

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad (11)$$

mittausten arvoja. Niiden otosvarianssi saadaan kaavalla

$$s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (12)$$

jossa

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

on arvojen x_1, x_2, \dots, x_n aritmeettinen keskiarvo. Otosvarianssi kuvaa havaintoarvojen hajaantuneisuutta tai keskittyneisyyttä niiden aritmeettisen keskiarvon ympärillä. (Mellin 2006)

Standardiepävarmuus s on varianssin $s^2(x)$ neliöjuuri eli toisin sanoen mittaustulosten keskihajonta. Se saadaan kaavalla

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (14)$$

Esimerkki tyypin A epävarmuudesta on mittauksen toistettavuus, joka voidaan määrittää esim. toistamalla mittausta n kertaa. Toistettavuuden aiheuttamana epävarmuutena voidaan käyttää keskiarvon keskihajontaa

$$u_A(x) = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (15)$$

Tyypin B epävarmuus voidaan saada esimerkiksi laitteen kalibrointitodistuksesta, laitteen spesifikaatioista, aikaisemmasta mittauskokemuksesta tai arvioimalla. Standardiepävarmuus lasketaan kaavalla

$$u_B(x) = \frac{a}{2\sqrt{3}}, \quad (16)$$

jossa a on arvio resoluutiosta, ja $\sqrt{3}$ kerrotaan kahdella, kun kyse on kokonaisvaihteluvälistä. Tyypin B epävarmuus ei pienene mittauksia toistamalla. (Hiltunen et al. 2011)

Yhdistetty mittausepävarmuus saadaan kaavalla

$$u_c(x) = \pm \sqrt{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2}, \quad (17)$$

jossa lasketaan standardiepävarmuudet neliöllisesti yhteen ja otetaan summasta neliöjuuri.

Laajennettu mittausepävarmuus saadaan kaavalla

$$U(x) = \pm \sqrt{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2} * k, \quad (18)$$

jossa yhdistetty mittausepävarmuus kerrotaan kattavuuskertoimella k .

Mittausvirheitä aiheuttavia tekijöitä on useita. Mittalaite voi olla viallinen, sitä voidaan lukea väärin, mittauskohde voi olla hankala havaita ja muut ympäristötekijät voivat vaikuttaa mittaustuloksiin. Näihin mittausvirheisiin voidaan vaikuttaa noudattamalla laitteen spesifikaatiota ja mittausohjeita. Kokemus mittausepävarmuutta aiheuttavista komponenteista sekä tietoisuus suotuisasta ympäristöstä on eduksi. (Hiltunen et al. 2011)

5.2 Studentin t-testi

T-testin avulla voidaan tutkia eroavatko kahden riippumattoman ryhmän keskiarvot toisistaan. Se on parametrinen testi, jossa käytön edellytyksenä on normaalijakaumaoletus. Vertailtavia ryhmiä tulee olla kaksi, ja mitta-asteikkojen on oltava joko välimatka- tai suhdeasteikkoja. Studentin t-testi on yksi käytetyimmistä menetelmistä kahden ryhmän välisten keskiarvoerojen arvioimiseksi. Testiä voidaan käyttää hyvinkin pienten aineistojen analysointiin, jos normaalijakaumaoletus on voimassa. On huomioitava, että aineistokoon kasvaessa normaalijakaumaoletuksen merkitys vähenee. (Tähtinen et al. 2011)

Keskeisimmät tunnusluvut keskiarvojen ja keskihajontojen lisäksi t-testissä ovat t- ja p-arvot (t testisuure ja p merkitsevyystaso). P-arvon avulla voidaan tehdä päätelmä siitä, onko ryhmien keskiarvojen ero tilastollisesti merkitsevä. Nollahypoteesi on H_0 : ryhmien keskiarvot ovat samat ja vaihtoehtoinen hypoteesi H_1 : ryhmien keskiarvot eroavat toisistaan. P-arvo kertoo riskin suuruuden, joka otetaan, mikäli nollahypoteesi jakaumien samankaltaisuudesta hylätään. Yleisesti hyväksytty riskitaso on 0,05 tai pienempi. Keskiarvotesteissä on kaksi tapaa määrittää vaihtoehtoinen hypoteesi. Tilasto-ohjelmat käyttävät oletuksena kaksisuuntaista vaihtoehtoista hypoteesia (engl. two-tailed), jossa ei voida määrittää ennakkoon kumman ryhmän keskiarvo on toisesta isompi. Yksisuuntaisessa vaihtoehtoisessa hypoteesissa (engl. one-tailed) tiedetään ennakkoon kuinka tietyn koeasetelman pitäisi vaikuttaa mitattavaan muuttujaan. (Tähtinen et al. 2011)

Tässä tutkimuksessa käytetään kahta riippumatonta ryhmää, joiden varianssit ovat eri suuret. Tämän laskemiseksi sovelletaan Studentin t-testin variaatiota, jota kutsutaan Welchin t-testiksi. Sen kaava on

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}, \quad (19)$$

joka noudattaa vapausastetta f , missä se määräytyy kaavasta

$$\frac{1}{f} = \frac{c^2}{n_1 - 1} + \frac{(1 - c)^2}{n_2 - 1}, \text{ jossa } c = \frac{\frac{s_1^2}{n_1}}{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}. \quad (20)$$

Yllä olevaa kaavaa kutsutaan Welch-Satterthwaite-yhtälöksi laskettaessa vapausaste, kun ei tiedetä koko populaation keskihajontaa. (Heikkilä 1998)

5.3 Saadut tulokset

Järjestelmän testikäyttö suoritettiin Säkylässä varastorakennuksessa, jossa järjestelmän antamia arvoja verrattiin mittanauhan antamiin arvoihin. Mittanauhan tarkkuutena voidaan pitää 1 millimetriä. Laseretäisyysmittari oli harkinnassa, mutta alle 100 euron laitteiden tarkkuudeksi luvataan 3 millimetriä. Muita mittauksessa käytettyjä laitteita olivat työntömastotrukki ja linjalaser. Ultraäänianturi kiinnitettiin trukin haarukkaan ja linjalaserin avulla asetettiin mitattava taso vaakasuoraan. Mittaus suoritettiin 5,4 - 5,6 °C lämpötilassa ja kosteusprosentti pysyi välillä 77,2 - 79,8 %. Mittausnäytteitä otettiin 48:lla eri etäisyydellä välillä 18,0 - 3791,0 mm, ja yksi näyte sisälsi 90 mittauskertaa. Mittaukset 1 - 10 suoritettiin noin 10 millimetrin välein ja loput 11 - 48 noin 100 millimetrin välein. Mittaustulokset tallennettiin Raspberry Pi 3 -tietokoneelle sarjaporttiyhteyden kautta. Tulokset esitetään tunnuslukuineen liitteessä A.

Mittaustuloksista laskettiin systemaattiset ja satunnaiset virheet Microsoft Excel 2016 -taulukkolaskentaohjelmalla. Systemaattinen virhe lasketaan vähentämällä mitattujen arvojen keskiarvo todellisesta etäisyydestä kaavalla

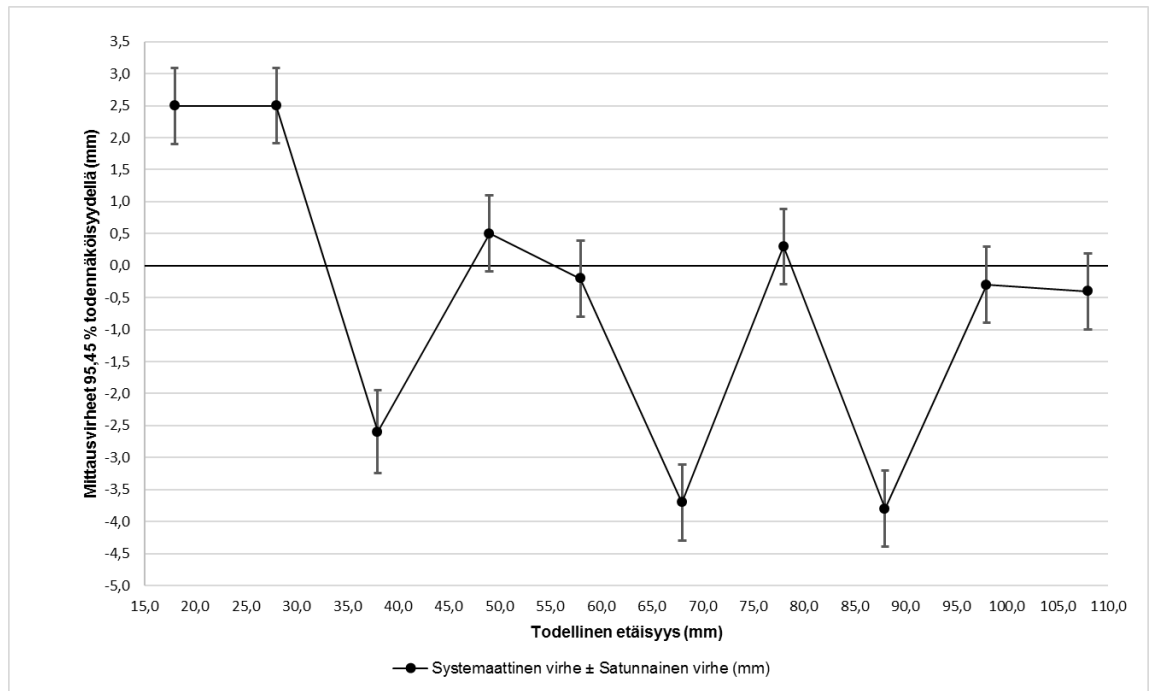
$$\bar{x}(90 \text{ mittausta}) - \text{todellinen etäisyys.} \quad (21)$$

Satunnainen virhe lasketaan laajennetun mittausepävarmuuden avulla kaavalla

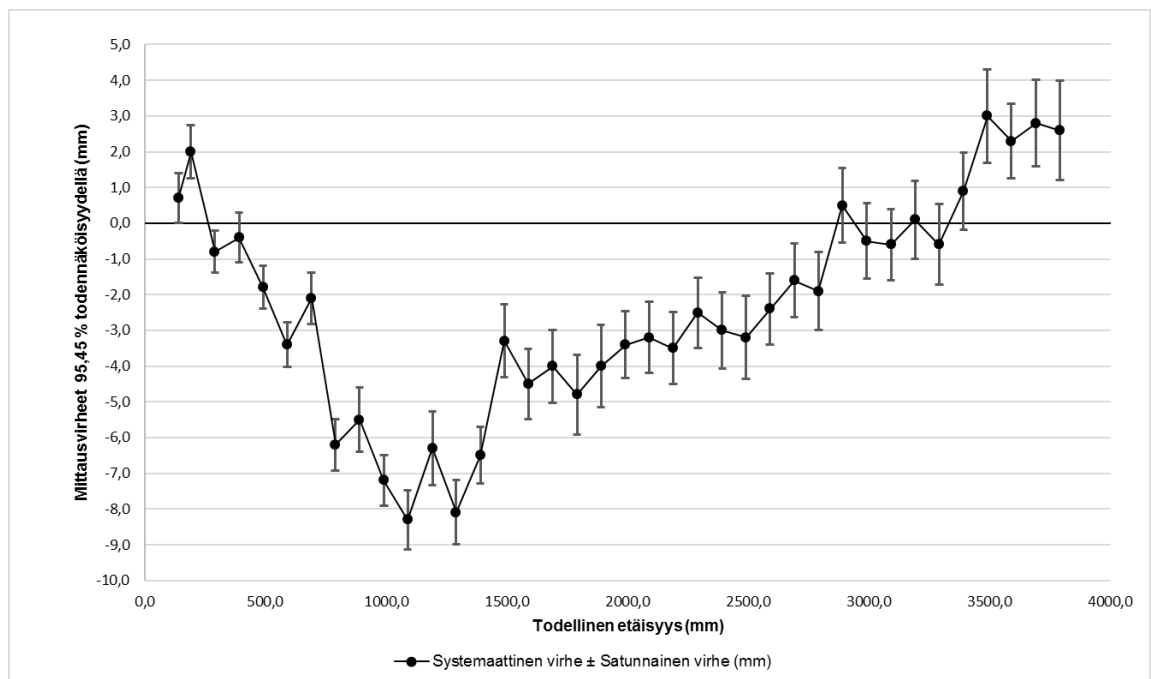
$$\pm \sqrt{\left(\frac{s}{\sqrt{90}}\right)^2 + \left(\frac{1,0}{2\sqrt{3}}\right)^2} * 2,0285, \quad (22)$$

jossa s on mittaustulosten keskihajonta ja se jaetaan mittauskertojen neliöjuurella. Systemaattiset ja satunnaiset virheet esitetään liitteessä A. Mittanauhan tarkkuus on 1,0 millimetriä ja se on tasajakautunut, joten se jaetaan neliöjuuri kolmella. Neliöjuuri kerrotaan vielä kahdella, koska halutaan saada kokonaisvaihteluväli. Standardiepävarmuudet lasketaan neliöllisesti yhteen ja summasta otetaan neliöjuuri. Tämä kerrotaan kattavuuskertoimella, joka saadaan Welch-Satterthwaiten yhtälöstä. Kattavuuskerrointa tarvitaan, kun halutaan laajentaa 68 % todennäköisyys tässä tapauksessa 95,45 % todennäköisyyteen. Tällä todennäköisyydellä ja vapausasteiden määrällä (89), saadaan kertoimeksi 2,0285.

Mittausvirheiden kuvaajat on jaettu kahteen osaan. Kuvassa 21 esitetään näytteiden 1 - 10 virheet noin 10 millimetrin välein. Kuvassa 22 esitetään näytteiden 11 - 48 virheet noin 100 millimetrin välein. Tämä jako on tehty luettavuuden helpottamiseksi.

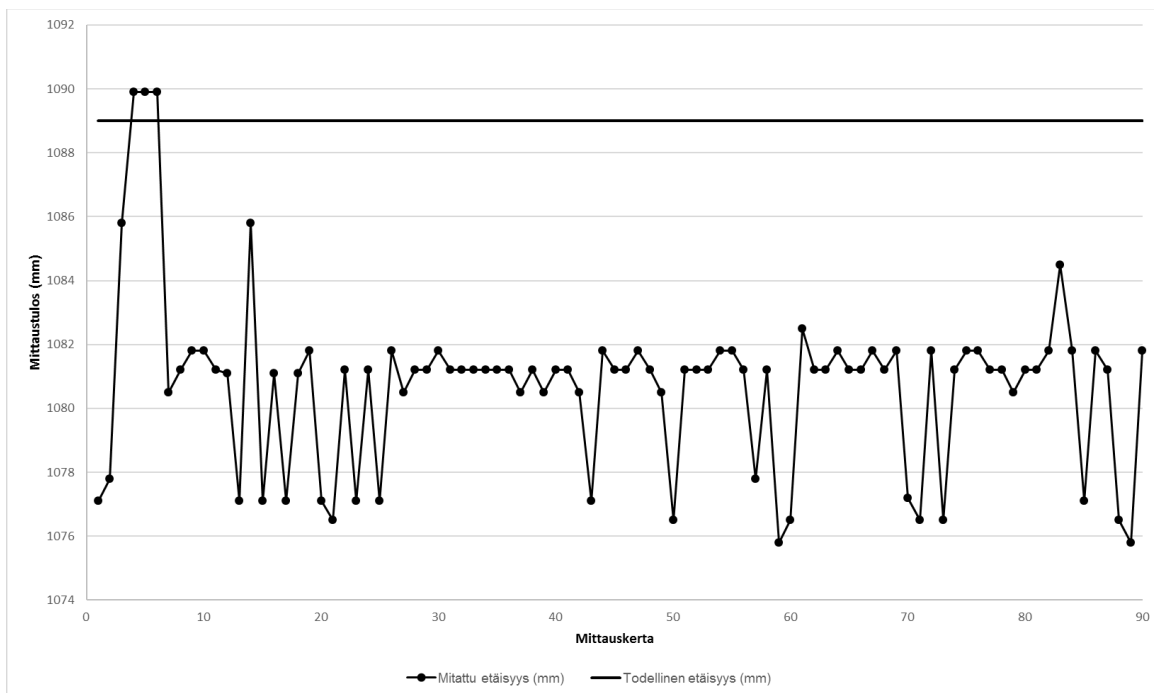


Kuva 21. Mittausvirheet näytteistä 1 - 10.



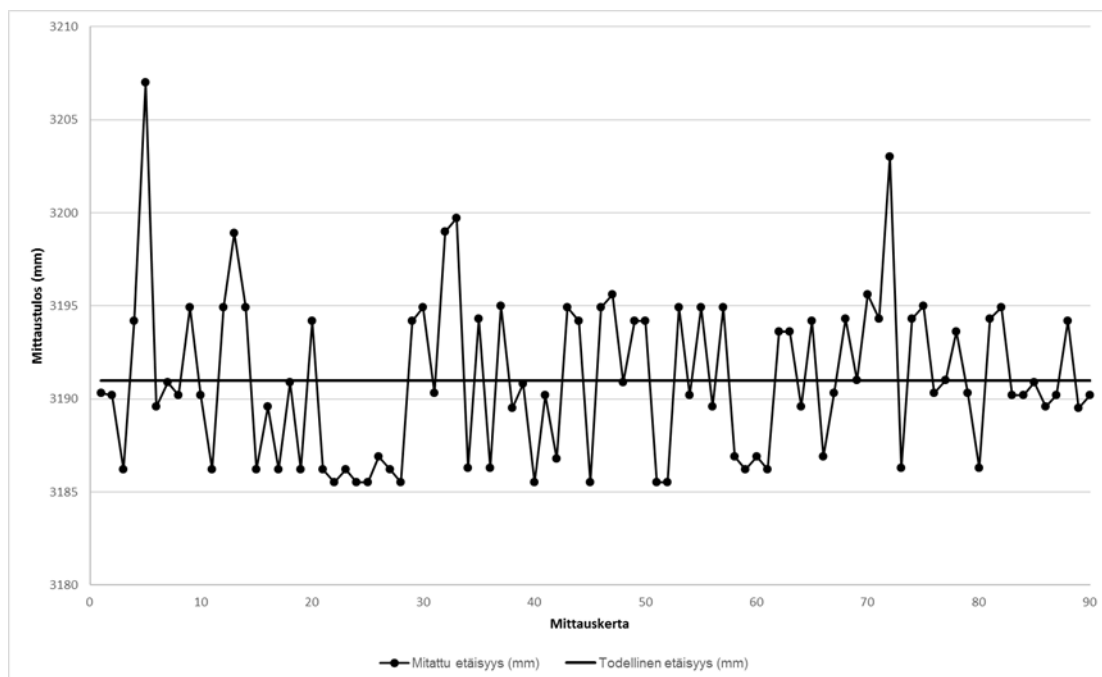
Kuva 22. Mittausvirheet näytteistä 11 - 48.

Tuloksia analysoitaessa havaitaan, että systemaattisten virheiden keskiarvo on -2,0 millimetriä ja satunnaisten virheiden keskiarvo on $\pm 0,9$ millimetriä. Suurin systemaattinen virhe on -8,3 millimetriä 1089,0 millimetrin mittausetäisyydellä. Kuvassa 23 esitetään suurimman systemaattisen virheen mittauskerrat. Kuvasta voidaan havaita mittaustuloksen jäävän todellisesta etäisyydestä, mutta niiden hajonta on pientä.



Kuva 23. Mittauskerrat, joissa systemaattinen virhe on suurin.

Kuvassa 24 esitetään pienimmän systemaattisen virheen mittauskerrat. Kuvasta voidaan havaita hajonnan olevan pientä ja keskittyvän todellisen etäisyyden ympärille. Pienin systemaattinen virhe on 0,1 millimetriä 3191,0 millimetrin mittausetäisyydellä.



Kuva 24. Mittauskerrat, joissa systemaattinen virhe on pienin.

Mittaustulosten analysoinnissa käytettiin myös Studentin t-testin variaatiota Welch-testiä, jolla tutkitaan kahden riippumattoman ryhmän keskiarvoja. Tässä tutkimuksessa ryhmät olivat todelliset etäisyydet ja mitatut etäisyydet. Ryhmien keskiarvoerojen selvittämiseksi käytettiin MathWorks MATLAB R2016b -laskentaohjelman ttest2-funktiota. Mittaustulokset tallennettiin mat-tiedostoihin, joita oli 48 näytettä. Niistä jokainen sisälsi tiedon todellisesta etäisyydestä (x) ja 90 mittauskertaa (y). Nollahypoteesina H_0 käytettiin: keskiarvoerot ovat vähemmän kuin mm_maara-muuttujan arvo. Vaihtoehtoisena hypoteesina H_1 käytettiin: keskiarvoerot ovat enemmän kuin mm_maara muuttujan arvo. Ttest2-funktiolle välitetään parametreina x , y , riskitaso (Alpha), vaihtoehtoisen hypoteesin tyyppi (Tail) ja varianssityyppi (Vartype). Tässä tapauksessa Alpha saa arvoksi joko 0,05, 0,01 tai 0,001. Vaihtoehtoinen hypoteesi saa arvoksi both, joka tarkoittaa, että selvitetään ryhmien keskiarvojen eroja kumpaankin suuntaan. Varianssityyppi saa arvoksi unequal, koska ryhmien varianssit eroavat toisistaan. Ohjelmakoodi 4 sisältää MATLAB-koodin, jolla tehdään keskiarvoerojen arviointi verrattuna asetettuun mittavirhettä ilmaisevaan muuttujaan.

```

alfa = 0.05                                %riskitaso
mm_maara=3.0;                             %mittavirhe millimetreinä
for i = 1:48
    load(['y_' num2str(i) '.mat'], 'x', 'y') %ladataan mat-tiedosto
    temp_x = x * ones(1,90);               %luodaan taulukko x:n arvoilla
    %verrataan todellista etäisyyttä mittaustulosten keskiarvoon ja asetetaan
    %ttest2-funktiolle välitettävät parametrit sen mukaisesti
    if x>=mean(y)
        temp_x=temp_x-mm_maara;
    else
        y=y-mm_maara;
    end
    %suoritetaan ttest2-funktio
    [hyp_equal(i),p_equal(i)] = ttest2(temp_x,y,'Alpha',alfa,'Tail','both',
    'Vartype','unequal');

end
hyp_equal                                %tulostetaan hypoteesien tulos
sum(hyp_equal)                          %lasketaan hyväksyttyjen
                                         %nollahypoteesien kokonaismäärä

```

Ohjelmakoodi 4. *MATLAB-koodi, jolla suoritetaan Welchin t-testi.*

Ohjelmakoodi 4 suoritettiin riskitasoilla 0,05, 0,01, 0,001 sekä mittausvirheiden arvoilla 3 - 10 millimetriä. Taulukko 13 sisältää todennäköisyydet tietyllä riskitasolla ja mittausvirheellä. Riskitasosarakkeiden arvot kertovat kuinka monta näytettä hyväksyy nollahypoteesin, ja suluissa ilmaistaan suhteellinen osuus 48 näytteestä. Welchin t-testin tuloksista voidaan havaita, että ultraäänianturin valmistajan antama tarkkuus 3,0 mm toteutuu parhaiten riskitasolla 0,05 75,0 % tapauksista mitatuista etäisyyksistä. Jos halutaan että mittausvirhe mahtuisi riskitasolla 0,05 sallitun toleranssin sisälle kaikilla mittausetäisyyksillä, toleranssia olisi kasvatettava 9,0 millimetriin. Kun otetaan huomioon tämän tutkimuksen alkuperäinen tavoite, voidaan todeta mittausjärjestelmän tuottavan riittävän tarkkoja tuloksia.

Taulukko 13. *Mittausvirheiden todennäköisyys eri riskitasoilla 3 - 10 mm välillä.*

| Mittausvirhe (mm) | Riskitaso 0,05 | Riskitaso 0,01 | Riskitaso 0,001 |
|-------------------|----------------|----------------|-----------------|
| 3,0 | 36 (75,0 %) | 33 (68,8 %) | 31 (64,6 %) |
| 4,0 | 38 (79,2 %) | 34 (70,8 %) | 34 (70,8 %) |
| 5,0 | 45 (93,8 %) | 43 (89,6 %) | 41 (85,4 %) |
| 6,0 | 44 (91,7 %) | 43 (89,6 %) | 43 (89,6 %) |
| 7,0 | 45 (93,8 %) | 45 (93,8 %) | 44 (91,7 %) |
| 8,0 | 46 (95,8 %) | 46 (95,8 %) | 46 (95,8 %) |
| 9,0 | 48 (100 %) | 46 (95,8 %) | 46 (95,8 %) |
| 10,0 | 48 (100 %) | 48 (100 %) | 48 (100 %) |

6 YHTEENVETO

Ultraäänitekniikkaan perustuvia antureita on käytössä yleisesti teollisuudessa, lääketieteessä ja palvelualoilla. Ne toimivat ihmiskorvan kuuloalueen yläpuolella. Yleisin tapa muodostaa ja havaita ultraääniaaltoja on hyödyntää jonkin kiteisen materiaalin, esimerkiksi kvartsin pietsosähköistä ilmiötä. Etäisyyttä mitattaessa ultraäänianturi lähettää pitkittäisiä ääniaaltoja pulssikaikumenetelmällä kohti kohdetta. Ääniaallon keila on kartio-mainen ja vain sen sisällä olevat kohteet havaitaan. Ultraäänianturilla tehtävät etäisyyssmittaukset perustuvat kulkeaikatekniikkaan. Ultraäänipulssin käyttämä aika kulkeakseen sen lähteestä mittaushaaraan ja siitä takaisin anturille on suoraan verrannollinen kohteen etäisyyteen. Ympäristötekijöistä lämpötila on merkittävin tekijä, joka vaikuttaa äänennopeuteen ilmassa.

Tässä tutkimuksessa toteutettiin edullinen 155 euroa maksava ultraäänimittausjärjestelmä, joka ottaa huomioon lämpötilan vaikutuksen äänennopeuteen. Järjestelmä koottiin komponenteista kuten Arduino Uno -mikrokontrollerista, Raspberry Pi 3 -tietokoneesta, HC-SR04-ultraäänianturista ja BME280-anturiyksiköstä (lämpötila, kosteus, ilmanpaine). Järjestelmään kuuluu myös Huawei E5377 langaton 3G/4G-modeemi, johon Raspberry Pi 3 -tietokone on langattomassa WLAN-yhteydessä. 3G/4G-modeemi välittää mittaustulokset pilvipalveluun.

Arduinon ohjelmointikieli on lähtöisin Processing- ja Wiring -ohjelmointikielistä. Sitä käsitellään Arduino IDE -kehitysympäristössä. Ohjelmakoodia kutsutaan sketseiksi, jotka tallennetaan ino-tiedostoiksi. Sketsi ajetaan Arduino Unon muistiin, jonka jälkeen mikrokontrolleri suorittaa sitä niin kauan kuin se saa virtaa. Tässä tutkimuksessa sketsi sisältää ohjelmakoodin, jolla HC-SR04-ultraäänianturi suorittaa lämpötilakompensoidun mittauksen. Se edellyttää tietoa lämpötilasta, joka saadaan BME280-anturiyksiköltä. Mittaustulos ja siitä laskettavat tilastolliset tunnusluvut välitetään sarjaporttiyhteyden kautta Raspberry Pi 3 -tietokoneeseen. Tiedon lukemiseen, tallentamiseen ja välittämiseen käytetään Python-koodia. Tiedon lukemiseen ja tallentamiseen on oma tiedostonsa ja välittämiseen omansa. Ensiksi mainitun tehtävä on lukea sarjaporttiyhteyttä ja tallentaa sieltä saadut mittaustulokset tiedostoon. Toinen tiedosto lukee tiedoista viimeisen rivin, jonka se lähettää pilvipalveluun.

Luvussa 3 on esitelty aiempaa tutkimusta, jossa on käytetty vastaavanlaisia välineitä ja menetelmiä kuin tässä tutkimuksessa. Artikkeleiden valintaperusteena oli, että ne sisältävät mittaustuloksia. Niitä esitettiin vain harvoissa tutkimusartikkeleissa. Luvussa 3.1 esitellyssä tutkimuksessa käytettiin eri mikrokontrolleria mutta samaa ultraäänianturia kuin tässä tutkimuksessa. Luvuissa 3.2 ja 3.3 esitellyissä tutkimuksissa käytettiin samaa mikrokontrolleria ja samaa ultraäänianturia. Ainoana eroina on luvun 3.3 tutkimuksessa käytetty eri lämpötila-anturi ja se, ettei luvun 3.2 tutkimuksessa oteta huomioon lämpötilaa.

Kuantama & Saraswati (2015) ja Saraswati et al. (2012) ovat tutkineet ultraäänimittausjärjestelmän toimintaa PVC-putken sisällä. Heidän mukaansa putken halkaisijaksi riittää 23 senttimetriä, jotta ultraäänianturi toimii kuten ilman putkea. Heidän artikkelista ei pystytä sanomaan, miten he ovat suorittaneet mittaukset (mittaukset, mittauksen suorittava ohjelmakoodi, onko lämpötilakompensaatiota vai ei?). He ovat mitanneet 5 - 285 cm välillä olevia etäisyyksiä. Suurin systemaattinen virhe on -4 cm etäisyyksillä 283 cm ja 285 cm. Mittaustulokset esitetään senttimetrin tarkkuudella, koska heidän mukaansa AT89S51-mikrokontrolleri ei pysty käsittelemään desimaalilukuja. Tuloksia tarkastelemalla havaitaan, että useat mitatut etäisyydet näyttävät taulukon 1 mukaan liian suurilta verrattuna todelliseen etäisyyteen. He ovat saaneet suhteelliseksi virheeksi 3,74 %, mutta artikkelista ei ilmene miten he ovat sen laskeneet.

Suleiman et al. (2015) ovat koonneet ultraäänimittausjärjestelmän, joka ottaa huomioon lämpötilan etäisyysmittauksissa. He ovat laskeneet kaavan 4 mukaisesti äänennopeuden ohjelmakoodissa käyttäen ilman adiabaattista vakiota ja kaasuvakiota. Jostain syystä he kuitenkin toteavat testausolosuhteiden +25 °C lämpötilan lisänsen virhettä. Myös he ovat päätyneet esittämään tulokset senttimetrin tarkkuudella. He ovat tehneet kuusi mitausta 50 - 250 cm välillä. Suurin systemaattinen virhe on +2 cm etäisyyksillä 75 cm ja 200 cm. He ovat laskeneet ilmoittamallaan kaavalla suhteelliseksi virheprosentiksi 0,9696 %.

Nakatani et al. (2014) ovat luoneet ultraäänimittausjärjestelmän. He ovat suorittaneet mittaukset edellä mainittuja tutkimuksia täsmällisemmin laboratorio-olosuhteissa ristisyötöpyötyä hyödyntäen. He ovat mitanneet millimetrin tarkkuudella 20 - 120 mm välillä 5 mm välein, jokaista etäisyyttä on mitattu kymmenen kertaa. Suurin systemaattinen virhe on -8,9 mm etäisyydellä 80 mm. He ovat suorittaneet epävarmuuslaskennan kuten tässä tutkimuksessa. Epävarmuuslaskennan avulla selvitetään satunnaisen virheen osuutta mittaustuloksissa. Suurin satunnainen virhe on $\pm 1,52$ mm etäisyydellä 70 mm. Mittaustuloksissa satunnainen virhe on keskimäärin $\pm 0,64$ mm.

Tässä tutkimuksessa mittaukset suoritettiin 5,4 - 5,6 °C lämpötilassa ja kosteusprosentti pysyi välillä 77,2 - 79,8 %. Mittausnäytteitä otettiin 48:lla eri etäisyydellä välillä 18,0 - 3791,0 mm, ja yksi näyte sisälsi 90 mittaukskertaa. Mittaukset 1 - 10 suoritettiin noin 10 millimetrin välein ja loput 11 - 48 noin 100 millimetrin välein. Tutkimuksen kaikkien mittaustulosten (1 - 48) systemaattisten virheiden keskiarvo on -2,0 millimetriä ja satunnaisten virheiden keskiarvo on $\pm 0,9$ millimetriä. Suurin systemaattinen virhe on -8,3 millimetriä 1089,0 millimetrin mittausetäisyydellä. Mittausvirheiden todennäköisyys saatiin Welchin t-testin tuloksista. Niistä voidaan havaita, että ultraäänianturin valmistajan antama tarkkuus 3,0 mm toteutuu parhaiten riskitasolla 0,05 75,0 % tapauksista mitatuista etäisyyksistä. Jos halutaan että mittausrvirhe mahtuisi riskitasolla 0,05 sallitun toleranssin sisälle kaikilla mittausetäisyyksillä, toleranssia olisi kasvatettava 9,0 millimetriin.

Tämän tutkimuksen mittaustulokset ovat tarkempia kuin edellä esitetyissä tutkimuksissa. Esimerkiksi suurin systemaattinen virhe ei ylitä missään kohtaa yhtä senttimetriä. Kaikkia

mittaustuloksia ei voida verrata sellaisenaan toisiinsa, koska mitatut etäisyydet vaihtelevat tapauskohtaisesti. Mittaustuloksia voidaan verrata edellä mainittuun Nakatani et al. (2014) tutkimuksen tuloksiin saman etäisyysvälin osalta. Tässä tutkimuksessa suurin systemaattinen virhe on -3,8 mm etäisyydellä 88,0 mm. Suurin satunnainen virhe on $\pm 0,6$ mm etäisyydellä 88,0 mm. Keskimääräinen satunnainen virhe on $\pm 0,6$ mm etäisyysvälillä 18,0 - 104,0 mm. Kuvassa 21 esitetään tämän etäisyysvälin mittausrvirheet.

Tässä tutkimuksessa luotiin ultraäänimittausjärjestelmän prototyyppi, joka täyttää sille asetetun tavoitteen pysyä 10 millimetrin virhemarginaalin sisällä. Se tuottaa riittävän luotettavia ja tarkkoja tuloksia, kun halutaan mitata säiliöiden täyttöastetta. Tutkimuksen lopputuloksena on, että edullisilla komponenteilla pystytään toteuttamaan luotettava ja tarkka ultraäänimittausjärjestelmä.

Jatkotutkimuksena voidaan suorittaa mittauksia käyttäen useaa anturiyksilöä ja materiaaleiltaan, pinnanmuodoiltaan sekä lämpötiloiltaan eroavia mittaushkohteita. On myös aiheellista suorittaa antureiden aikasarja-analyysi, jotta saadaan enemmän tietoa niiden virrankäytöstä. Niin ikään on aiheellista suorittaa pidempiaikainen mittaus, jossa testataan järjestelmän komponenttien kestävyyttä eri olosuhteissa. Jos järjestelmästä halutaan tehdä tuote, täytyy kiinnittää huomiota kotelointiin ja asennuksiin liittyviin asioihin.

LÄHTEET

Adafruit, 2016. *Adafruit BME280 Humidity + Barometric Pressure + Temperature Sensor Breakout*. Saatavissa: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout/overview> [Viitattu syyskuu 2016]

Airmar Technology Corporation 2016. *Overview for Applying Ultrasonic Technology*. Saatavissa: http://www.airmartechonology.com/uploads/airpdf/intro_overview.pdf [Viitattu lokakuu 2016]

Álvarez Franco, F. J. & Ureña Ureña, J. 2009. Outdoor Sonar Sensing. *Advances in Sonar Technology*. Toim. Sergio Rui Silva, In-Teh.

Arcbotics 2016. *Ultrasonic Range Finder*. Saatavissa: <http://arcbotics.com/products/sparki/parts/ultrasonic-range-finder/> [Viitattu joulukuu 2016]

Arduino, 2016. *Arduino/Genuino UNO*. Saatavissa: <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno> [Viitattu elokuu 2016]

Bosch, 2016. *Final Datasheet BME280 Environmental sensor*. Saatavissa: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BME280_DS001-10.pdf [Viitattu syyskuu 2016]

Cartz, L., 1995. *Nondestructive Testing*, ASM International.

Cheeke, J. & David, N., 2002. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, CRC Press.

COSS 2016. *Avoim lähdekoodi*. Saatavissa: <https://coss.fi/avoimuus/avoin-lahdekoodi/> [Viitattu joulukuu 2016]

Dennis, A. K. 2016. *Raspberry Pi Computer Architecture Essentials: Explore Raspberry Pi's Architecture through Innovative and Fun Projects*, Packt Publishing.

Dubins, D. 2016. QuickStats - Descriptive Statistics for Arduino Float Arrays. Saatavissa: <https://github.com/dndubins/QuickStats> [Viitattu joulukuu 2016]

Eckel, T. 2016. *NewPing Arduino Library for Arduino*. Saatavissa: <https://bitbucket.org/teckel12/arduino-new-ping/wiki/Home> [Viitattu joulukuu 2016]

Elecfreaks 2016. *Ultrasonic Ranging Module HC - SR04*. Saatavissa: <http://www.micro-pik.com/PDF/HCSR04.pdf> [Viitattu elokuu 2016]

FAO 2017. *A Gaussian or normal distribution*. <http://www.fao.org/docrep/W7295E/w7295e04.jpg> [Viitattu tammikuu 2017]

Glenn, T. 2016. *BME280 Arduino Library*. Saatavissa: <http://github.com/finitespace/BME280> [Viitattu joulukuu 2016]

Heikkilä, T. 1998. *Tilastollinen tutkimus*, Edita Publishing Oy.

Hiltunen E., Linko L., Hemminki S., Hägg M., Järvenpää E., Saarinen P., Simonen S. & Kärhä P. 2011. *Laadukkaan mittaamisen perusteet*. Metrologian neuvottelukunta ja Mitattekniikan keskus, MIKES. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/MIKES/2011-J4.pdf> [Viitattu tammikuu 2017]

Howarth, P. & Redgrave, F. 2008. *Metrology – In Short, 3rd Edition*, EURAMET project 1011. Saatavissa: http://www.euramet.org/get/?tx_stag_base%5Bfile%5D=3743&tx_stag_base%5Baction%5D=downloadRaw&tx_stag_base%5Bcontroller%5D=Base [Viitattu tammikuu 2017]

Huawei 2016. *Huawei E5377 Manual*. Saatavissa: <http://download-c.huawei.com/download/downloadCenter?downloadId=22270&version=39123&siteCode=worldwide> [Viitattu marraskuu 2016]

Ihara, I. 2008. Ultrasonic Sensing: Fundamentals and its Applications to Nondestructive Evaluation. *Sensors: Advancements in Modeling, Design Issues, Fabrication and Practical Applications*. Toim. Subhas Chandra Mukhopadhyay & Yueh-Min Huang, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Saatavissa: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-69033-7_14 [Viitattu elokuu 2016]

Karlsson, N. & Pedersen, O. 2014. Ultrasonic Displacement Sensors. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*. Toim. John G. Webster & Halit Eren, CRC Press. Saatavissa: <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/b15474> [Viitattu marraskuu 2016]

Keinänen, T. & Järvinen, M. 2014. *Mittaustekniikka*, Sanoma Pro Oy.

Kelemen, M., Virgala, I., Kelemenová, T., Miková, L., Frankovský, P., Lipták, T. & Lörinc, M. 2015. Distance Measurements via Using of Ultrasonic Sensor. *Journal of Automation and Control*, Vol. 3, No. 3, pp. 71-74.

Kuantama, E. & Saraswati, M. A. 2015. Water Level Measurement and Preflood Warning System with SMS Method. *Internetworking Indonesia Journal*, Vol. 7, No.2.

Mansfield, M., O'Sullivan, C. 2011. *Understanding Physics*, Wiley.

Marlin P. Jones & Assoc. Inc. 2016. *HC-SR04 User Guide*. Saatavissa: https://www.mpja.com/download/hc-sr04_ultrasonic_module_user_guidejohn.pdf [Viitattu elokuu 2016]

Massa, D., P., 1999. *Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance Measurement Part 2: Optimizing Sensor Selection*. Saatavissa: <http://www.sensorsmag.com/sensors/acoustic-ultrasound/choosing-ultrasonic-sensor-proximity-or-distance-measurement-838> [Viitattu lokakuu 2016]

Measurement Systems Analysis (MSA) Work Group 2010. *Measurement Systems Analysis: Reference Manual, Fourth Edition*, Automotive Industry Action Group (AIAG).

Mellin, I. 2006. Tilastolliset menetelmät, TKK. Saatavissa: <https://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Johdanto.pdf> [Viitattu tammikuu 2017]

Milligan, S., Cavanagh, M. & Vandelinde, H. 2013. *Understanding Ultrasonic Level Measurement*, Momentum Press.

Milligan, S. 2006, *How to Select an Ultrasonic System*. Saatavissa: http://www.automation.siemens.com/w1/e/automation-technology/pi/techn_publications/selectultrasonic_en.pdf [Viitattu syyskuu 2016]

Monk, S. 2016. *Programming Arduino: Getting Started with Sketches*, McGraw-Hill Education.

Molloy, D. 2016. *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux*, Wiley.

Nakatani, A. M., Guimarães, A. V. & Neto, V. M. 2014. *Medição com Sensor Ultrassônico HC-SR04*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Departamento de Eletrônica, Curitiba, Brasil.

Nalini, B., Nandhini, V., Kavitha, E. & Chandralekha, R. 2014. *Implementation of Temperature Compensation Technique with Ultrasonic Ranging for Obstacle Identification*. International Journal for Research and Development in Engineering (IJRDE), Special Issue, pp. 230-234.

Openstax College of Rice University, 2013. *College Physics Textbook Equity Edition Volume 2 of 3: Chapters 13 - 24*, Textbook Equity Published.

Premed HQ 2016. *Transverse and Longitudinal Waves*. Saatavissa: <https://www.premedhq.com/transverse-and-longitudinal-waves> [Viitattu marraskuu 2016]

Raspberry 2016. *Raspberry Pi 3*. Saatavissa: <https://www.raspberrypi.org/magpi/raspberry-pi-3-specs-benchmarks/> [Viitattu syyskuu 2016]

Rockwell Automation/Allen-Bradley, 2016, *Ultrasonic Sensing*. Saatavissa: <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12772/6543185/12041221/12041229/Ultrasonic-Sensing.html> [Viitattu elokuu 2016]

Saraswati, M., Kuantama, E. & Mardjoko P. 2012. Design and Construction of Water Level Measurement System Accessible through SMS. *2012 Sixth UKSim/AMSS European Symposium on Computer Modelling and Simulation (EMS)*, November 14-16, 2012, Malta.

Seebo 2016. Ultrasonic Sensors: Applications in the Internet of Things. Saatavissa: <http://academy.seebo.com/ultrasonic-sensors-work-internet-of-things/> [Viitattu tammi-kuu 2017]

Suleiman, M., Saidu, G.I., Ilyasu, M.I., Adeboye, O.A. & Hamza, M. 2015. Ultrasonic Fluid Level Measuring Device. *International Journal of Research in Science*, Vol. 1, No.1, pp. 27-31.

TKK 2004. *Mittaustekniikan perusteet / luento 6*. Saatavissa: <http://metrology.tkk.fi/courses/s108-195/Luento6.pdf> [Viitattu joulukuu 2016]

Tähtinen, J., Laakkonen, E. & Broberg, M. 2011. *Tilastollisen aineiston käsitellyn ja tulokinnan perusteita*. Turun yliopiston kasvatustieteiden laitos ja Opettajankoulutuslaitos.

Upton, E. & Halfacree G. 2016. *Raspberry Pi: User Guide*, Wiley.

Venkitachalam, M. 2016. *Python Playground: Geeky Projects for the Curious Programmer*, No Starch Press.

Verma, S. K. 2014. Automated water head controller for domestic application. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 3, No.11, pp. 154-159.

Williams, D. 2012. The Physics of Ultrasonic. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, Vol. 13, No. 6, pp. 264-268.

Wiora, G. 2005. *Principle of a sonar or radar distance measurement*. Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonar_Principle_EN.svg [Viitattu elokuu 2016]

LIITTEET

Liite A: Mittaustulosten tunnusluvut sekä systemaattiset ja satunnaiset virheet

LIITE A: MITTAUSTULOSTEN TUNNUSLUVUT SEKÄ SYSTEMAATTISET JA SATUNNAISET VIR- HEET

| Näyte | Todellinen etäisyys | Maksimi | Minimi | Keskiarvo | Keskihajonta | Keskivirhe | Mediaani | System. virhe (mm) | Satunn. virhe (mm) |
|-------|------------------------|---------|--------|-----------|--------------|------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 18,0 | 21,2 | 19,9 | 20,5 | 0,5 | 0,1 | 20,6 | 2,5 | ±0,6 |
| 2 | 28,0 | 31,3 | 30,0 | 30,5 | 0,3 | 0,0 | 30,6 | 2,5 | ±0,6 |
| 3 | 38,0 | 39,3 | 34,0 | 35,4 | 1,3 | 0,1 | 35,3 | -2,6 | ±0,6 |
| 4 | 49,0 | 50,0 | 48,0 | 49,5 | 0,5 | 0,1 | 49,4 | 0,5 | ±0,6 |
| 5 | 58,0 | 59,4 | 56,7 | 57,8 | 0,4 | 0,0 | 58,1 | -0,2 | ±0,6 |
| 6 | 68,0 | 65,4 | 63,4 | 64,3 | 0,4 | 0,0 | 64,1 | -3,7 | ±0,6 |
| 7 | 78,0 | 78,8 | 77,5 | 78,3 | 0,4 | 0,0 | 78,1 | 0,3 | ±0,6 |
| 8 | 88,0 | 84,8 | 83,5 | 84,2 | 0,4 | 0,0 | 84,1 | -3,8 | ±0,6 |
| 9 | 98,0 | 99,5 | 96,9 | 97,7 | 0,4 | 0,0 | 97,5 | -0,3 | ±0,6 |
| 10 | 108,0 | 108,9 | 106,9 | 107,6 | 0,4 | 0,0 | 107,6 | -0,4 | ±0,6 |
| 11 | 141,0 | 145,7 | 139,7 | 141,7 | 1,7 | 0,2 | 141,0 | 0,7 | ±0,7 |
| 12 | 191,0 | 195,9 | 190,5 | 193,0 | 2,1 | 0,2 | 194,1 | 2,0 | ±0,7 |
| 13 | 291,0 | 291,6 | 289,6 | 290,2 | 0,4 | 0,0 | 290,2 | -0,8 | ±0,6 |
| 14 | 391,0 | 394,6 | 389,2 | 390,6 | 1,7 | 0,2 | 389,9 | -0,4 | ±0,7 |
| 15 | 491,0 | 493,0 | 488,3 | 489,2 | 0,6 | 0,1 | 489,0 | -1,8 | ±0,6 |
| 16 | 591,0 | 589,3 | 583,3 | 587,6 | 0,9 | 0,1 | 588,0 | -3,4 | ±0,6 |
| 17 | 691,0 | 693,0 | 683,0 | 688,9 | 2,0 | 0,2 | 687,7 | -2,1 | ±0,7 |
| 18 | 790,0 | 791,4 | 782,0 | 783,8 | 2,0 | 0,2 | 783,4 | -6,2 | ±0,7 |
| 19 | 890,0 | 891,1 | 881,8 | 884,5 | 3,2 | 0,3 | 883,1 | -5,5 | ±0,9 |
| 20 | 991,0 | 991,5 | 982,8 | 983,8 | 1,8 | 0,2 | 983,5 | -7,2 | ±0,7 |
| 21 | 1089,0 | 1089,0 | 1075,8 | 1080,7 | 2,7 | 0,3 | 1081,2 | -8,3 | ±0,8 |
| 22 | 1192,0 | 1193,6 | 1180,2 | 1185,7 | 4,0 | 0,4 | 1185,6 | -6,3 | ±1,0 |
| 23 | 1290,0 | 1291,3 | 1276,6 | 1281,9 | 3,2 | 0,3 | 1282,0 | -8,1 | ±0,9 |
| 24 | 1391,0 | 1397,1 | 1382,4 | 1384,5 | 2,5 | 0,3 | 1383,7 | -6,5 | ±0,8 |
| 25 | 1490,0 | 1494,2 | 1480,8 | 1486,7 | 3,9 | 0,4 | 1486,2 | -3,3 | ±1,0 |
| 26 | 1589,0 | 1589,9 | 1579,2 | 1584,5 | 3,7 | 0,4 | 1584,5 | -4,5 | ±1,0 |
| 27 | 1690,0 | 1691,0 | 1680,9 | 1686,0 | 3,9 | 0,4 | 1685,6 | -4,0 | ±1,0 |
| 28 | 1791,0 | 1799,4 | 1781,2 | 1786,2 | 4,4 | 0,5 | 1786,0 | -4,8 | ±1,1 |
| 29 | 1890,0 | 1897,7 | 1879,0 | 1886,0 | 4,6 | 0,5 | 1885,0 | -4,0 | ±1,1 |
| 30 | 1991,0 | 1994,8 | 1980,7 | 1987,6 | 3,4 | 0,4 | 1986,1 | -3,4 | ±0,9 |
| 31 | 2090,0 | 2093,2 | 2079,1 | 2086,8 | 3,8 | 0,4 | 2087,8 | -3,2 | ±1,0 |
| 32 | 2189,0 | 2195,6 | 2181,5 | 2185,5 | 3,8 | 0,4 | 2182,9 | -3,5 | ±1,0 |
| 33 | 2292,0 | 2297,3 | 2283,9 | 2289,5 | 3,7 | 0,4 | 2289,3 | -2,5 | ±1,0 |
| 34 | 2392,0 | 2401,7 | 2384,3 | 2389,0 | 4,2 | 0,4 | 2389,0 | -3,0 | ±1,1 |
| 35 | 2491,0 | 2504,8 | 2482,7 | 2487,8 | 4,7 | 0,5 | 2487,7 | -3,2 | ±1,2 |
| 36 | 2590,0 | 2600,5 | 2582,4 | 2587,6 | 3,8 | 0,4 | 2587,1 | -2,4 | ±1,0 |
| 37 | 2691,0 | 2700,3 | 2682,9 | 2689,4 | 4,0 | 0,4 | 2687,6 | -1,6 | ±1,0 |
| 38 | 2791,0 | 2801,2 | 2783,2 | 2789,1 | 4,3 | 0,5 | 2788,0 | -1,9 | ±1,1 |
| 39 | 2890,0 | 2903,0 | 2883,0 | 2890,5 | 4,0 | 0,4 | 2891,0 | 0,5 | ±1,0 |
| 40 | 2991,0 | 3004,1 | 2984,5 | 2990,5 | 4,1 | 0,4 | 2990,7 | -0,5 | ±1,1 |
| 41 | 3092,0 | 3101,2 | 3086,4 | 3091,4 | 3,8 | 0,4 | 3091,2 | -0,6 | ±1,0 |
| 42 | 3191,0 | 3207,0 | 3185,5 | 3191,1 | 4,3 | 0,5 | 3190,3 | 0,1 | ±1,1 |
| 43 | 3291,0 | 3310,1 | 3284,6 | 3290,4 | 4,5 | 0,5 | 3289,4 | -0,6 | ±1,1 |
| 44 | 3392,0 | 3403,2 | 3385,8 | 3392,9 | 4,2 | 0,4 | 3391,2 | 0,9 | ±1,1 |
| 45 | 3490,0 | 3510,5 | 3483,6 | 3493,0 | 5,5 | 0,6 | 3493,0 | 3,0 | ±1,3 |
| 46 | 3589,0 | 3604,2 | 3586,8 | 3591,3 | 4,0 | 0,4 | 3591,5 | 2,3 | ±1,0 |
| 47 | 3692,0 | 3711,5 | 3688,8 | 3694,8 | 5,0 | 0,5 | 3694,2 | 2,8 | ±1,2 |
| 48 | 3791,0 | 3814,6 | 3788,5 | 3793,6 | 5,9 | 0,6 | 3791,9 | 2,6 | ±1,4 |